

The background of the cover is an aerial photograph of a city, likely Seville, Spain, showing a dense urban layout with buildings and streets. The image is overlaid with a complex, dark geometric grid pattern of intersecting lines. Additionally, several large, semi-transparent colored shapes (in shades of red, blue, yellow, and purple) are layered over the cityscape, creating a vibrant, abstract composition. The text is centered on the right side of the cover, overlaid on a dark, semi-transparent rectangular area.

María Victoria Requena García de la Cruz
Emilio Romero Sánchez
(coordinadores)

**Soluciones
integradas
de fachada**
para la mejora
energética y sísmica
de barriadas de
antigua construcción
Refuerzo ENERgético y SÍSmico

Editorial Universidad de Sevilla



**SOLUCIONES INTEGRADAS DE FACHADA
PARA LA MEJORA ENERGÉTICA
Y SÍSMICA DE BARRIADAS DE
ANTIGUA CONSTRUCCIÓN**

COLECCIÓN ARQUITECTURA

DIRECTOR DE LA COLECCIÓN

Ángel Martínez García-Posada.

CONSEJO DE REDACCIÓN

Ángel Luis Candelas Gutiérrez. Universidad de Sevilla.

Enrique Domingo Fernández Nieto. Universidad de Sevilla.

Miguel Hernández Valencia. Universidad de Sevilla.

Mercedes Linares Gómez del Pulgar. Universidad de Sevilla.

José María Manzano Jurado. Universidad de Granada.

Francisco Javier Montero Fernández. Universidad de Sevilla.

María Teresa Pérez Cano. Universidad de Sevilla.

Ramón Pico Valimaña. Universidad de Sevilla.

Francisco Sebastián. Pinto Puerto. Universidad de Sevilla.

Francisco de Paula Pontiga Romero. Universidad de Sevilla.

Carlos Jesús Rosa Jiménez. Universidad de Málaga.

Victoriano Sainz Gutiérrez. Universidad de Sevilla.

Juan José Vázquez Avellaneda. Universidad de Sevilla.

COMITÉ CIENTÍFICO

José Manuel Aguiar Portela de Costa. Universidade de Lisboa, Portugal.

Isabel Arteaga Arredondo. Universidad de los Andes, Colombia.

Anita Berrizbeitia. Harvard University, EE.UU.

Robert Brufau e Niubó. Universidad Politécnica de Cataluña.

Antonella Conttin. Politecnico de Milano, Italia.

Thomas B.F. Cummins. Harvard University, EE.UU.

María Cristina Da Silva Schicci. Pontificia Universidade Católica de Campinas, Brasil.

Carmen Escoda Pastor. Universidad Politécnica de Cataluña.

Antonio Gómez-Blanco Pontes. Universidad de Granada.

Josefina González Cubero. Universidad de Valladolid.

Zijlstra Hielkje. Delft University of Technology, Países Bajos

Maite Méndez Baiges. Universidad de Málaga.

Javier Monclús Fraga. Universidad de Zaragoza.

Ignacio Oteiza San José. Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja, Madrid.

Dominique Poulot. Université Paris I Panthéon-Sorbonne. Francia.

Susan Roaf. University of Edinburgh, Reino Unido.

Fausto E. Rodríguez Manzo. Universidad Autónoma Metropolitana, México, D.F., México.

Jorge Torres Cueco. Universidad Politécnica de Valencia.

Ferrán Ventura Blanch. Universidad de Málaga.

María Victoria Requena García de la Cruz
Emilio Romero Sánchez
(coordinadores)

SOLUCIONES INTEGRADAS DE FACHADA PARA LA MEJORA ENERGÉTICA Y SÍSMICA DE BARRIADAS DE ANTIGUA CONSTRUCCIÓN

Proyecto **RENERSIS**,
Refuerzo **ENERgético** y **SÍSmico**



Sevilla 2023

Colección Arquitectura

Núm. 47

COMITÉ EDITORIAL

Araceli López Serena
(Directora de la Editorial Universidad de Sevilla)
Elena Leal Abad
(Subdirectora)

Concepción Barrero Rodríguez
Rafael Fernández Chacón
María Gracia García Martín
María del Pópulo Pablo-Romero Gil-Delgado
Manuel Padilla Cruz
Marta Palenque
María Eugenia Petit-Breuilh Sepúlveda
Marina Ramos Serrano
José-Leonardo Ruiz Sánchez
Antonio Tejedor Cabrera

Reservados todos los derechos. Ni la totalidad ni parte de este libro puede reproducirse o transmitirse por ningún procedimiento electrónico o mecánico, incluyendo fotocopia, grabación magnética o cualquier almacenamiento de información y sistema de recuperación, sin permiso escrito de la Editorial Universidad de Sevilla.

Esta obra está financiada por el proyecto *RENERSIS. Cálculo y diseño de soluciones de fachada para la mejora energética y sísmica de grandes barriadas de antigua construcción* (US.20-01).
Consejería de Fomento, Infraestructuras y Ordenación del Territorio. Junta de Andalucía.



Diseño de cubierta: Santi García Hernández

Edición digital de la primera edición impresa de 2023

© Editorial Universidad de Sevilla 2023
c/ Porvenir, 27 - 41013 Sevilla
Tlf. 954 487 447; 954 487 451 - Fax 954 487 443
Correo electrónico: info-eus@us.es
Web: <https://editorial.us.es>

© María Victoria Requena García de la Cruz y Emilio Romero Sánchez (coords.), 2023

© De los textos, sus autores 2023

ISBN: 978-84-472-2413-5

DOI: <https://dx.doi.org/10.12795/9788447224135>

Maquetación y edición electrónica: Dosgraphic, S.L. (dosgraphic@dosgraphic.es)

Índice

Listado de abreviaturas	11
1. RENERSIS, un proyecto para la mejora integral de la eficiencia energética y la seguridad sísmica de edificios existentes	13
<i>María-Victoria Requena-García-Cruz, Emilio Romero-Sánchez y Antonio Morales-Esteban</i>	
1.1. Antecedentes	14
1.2. Motivación	14
1.3. Objetivos y alcance del trabajo.....	16
1.4. Metodología.....	17
1.5. Ámbitos del proyecto	19
1.6. Complementariedad y sinergias.....	19
1.7. Referencias	20
2. Eficiencia energética y vulnerabilidad sísmica del parque edificatorio actual. El caso de Andalucía.....	23
<i>Emilio Romero-Sánchez, M. Pilar López Piña, María-Victoria Requena-García-Cruz y Antonio Morales-Esteban</i>	
2.1. Nivel europeo	24
2.2. Nivel España	25
2.3. El caso de Andalucía.....	27
2.3.1. Consumo y comportamiento energético.....	28
2.3.2. Seguridad sísmica	31
2.4. La rehabilitación como estrategia sostenible.....	34
2.5. Referencias	35
3. Medidas para la mejora de la eficiencia energética y la seguridad sísmica en los edificios existentes	41
<i>M. Pilar López-Piña, María-Victoria Requena-García-Cruz y Emilio Romero-Sánchez</i>	
3.1. Introducción.....	42
3.2. Medidas de la mejora de la eficiencia energética.....	42
3.2.1. Tipos y clasificación de las medidas	42
3.2.2. Medidas para la reducción de la demanda energética.....	43
3.2.3. Medidas para la mejora de la eficiencia de las instalaciones.....	51
3.3. Medidas para la mejora del comportamiento sísmico	51
3.3.1. Edificios de estructura de hormigón armado.....	52

3.3.2.	Edificios de estructura de muros de carga.....	56
3.3.3.	Para edificios de estructura metálica.....	61
3.4.	Conclusiones.....	61
3.5.	Referencias.....	61
4.	Actuaciones combinadas y sistemas integrados para la mejora sísmica y energética. Metodologías de evaluación	67
	<i>M. Pilar López-Piña y María-Victoria Requena-García-Cruz</i>	
4.1.	La importancia de la intervención combinada e integrada.....	68
4.2.	Actuaciones combinadas de mejora energética y sísmica.....	69
4.2.1.	Criterios para la combinación de medidas y metodologías de evaluación	69
4.2.2.	Tipos de combinaciones estudiadas y resultados	71
4.3.	Los sistemas integrados	73
4.3.1.	Los beneficios de los sistemas integrados	73
4.3.2.	Tipos de sistemas y resultados	73
4.4.	Metodologías de evaluación y comparación de las diferentes estrategias y sistemas.....	82
4.4.1.	Evaluación económica y financiera.....	82
4.4.2.	Evaluación del grado de sostenibilidad	84
4.5.	Conclusiones.....	85
4.6.	Referencias	86
5.	La caracterización patrimonial en barriadas del siglo XX. El caso de El Plantinar en la ciudad de Sevilla.....	89
	<i>Julia Díaz-Borrego y Julia Rey Pérez</i>	
5.1.	Introducción.....	90
5.2.	Contexto político español. Antecedentes.....	92
5.3.	Fase I caracterización patrimonial.....	93
5.3.1.	Análisis desde la escala urbana	93
5.3.2.	Análisis desde la escala del objeto	101
5.3.3.	Análisis desde la escala perceptiva.....	116
5.4.	Consideraciones finales.....	116
5.5.	Referencias	117
6.	Caracterización geotécnica de la barriada de El Plantinar	119
	<i>Beatriz Zapico-Blanco y Antonio Morales-Esteban</i>	
6.1.	Situación de la barriada	120
6.2.	Marco geológico-geotécnico	121
6.2.1.	Tectónica.....	121
6.2.2.	Estratigrafía.....	123

6.2.3.	Mineralogía y geotecnia	124
6.2.4.	Hidrogeología	125
6.3.	Estudios geotécnicos existentes	126
6.3.1.	Cotas geotécnicas	129
6.3.2.	Propiedades geotécnicas	129
6.3.3.	Nivel freático	130
6.4.	Referencias	132
7.	Caracterización estructural y evaluación del comportamiento frente al sismo de edificios de antiguas barriadas	133
	<i>María-Victoria Requena-García-Cruz y Antonio Morales-Esteban</i>	
7.1.	Introducción	134
7.2.	Descripción del caso de estudio	136
7.2.1.	La barriada del Plantinar	136
7.2.2.	Edificio seleccionado como caso de estudio	136
7.2.3.	Determinación de la peligrosidad sísmica	137
7.3.	Caracterización estructural	137
7.4.	Evaluación del comportamiento sísmico	140
7.4.1.	Modelado numérico	140
7.4.2.	Análisis estáticos no lineales	142
7.4.3.	Criterios para el análisis de la seguridad sísmica	142
7.5.	Análisis preliminar del caso de estudio	143
7.5.1.	Análisis modal	143
7.5.2.	Análisis del daño sísmico	143
7.6.	Conclusiones	144
7.7.	Referencias	144
8.	Análisis del comportamiento energético en barriadas del siglo XX en clima mediterráneo. Aplicación en El Plantinar	149
	<i>Julia Díaz-Borrego, Ignacio Acosta, Miguel Ángel Campano y Jéscica Fernández-Agüera</i>	
8.1.	Introducción	150
8.1.1.	Termografía Infrarroja	150
8.1.2.	Ensayo de Transmitancia (U)	151
8.1.3.	Ensayos de estanqueidad	151
8.2.	Aplicación en El Plantinar: análisis de comportamiento energético	152
8.2.1.	Caracterización constructiva	152
8.2.2.	Caracterización del comportamiento energético de los edificios	153
8.2.3.	Modelado del comportamiento energético de los edificios	158
8.2.4.	Evaluación energética del estado actual de las viviendas de El Plantinar ..	161
8.3.	Referencias	162

9. Análisis de sensibilidad de soluciones integradas para la rehabilitación energética y sísmica de edificios existentes.....	165
<i>María-Victoria Requena-García-Cruz, Julia Díaz-Borrego, Emilio Romero-Sánchez y Antonio Morales-Esteban</i>	
9.1. Descripción de la problemática del caso de estudio.....	166
9.2. Descripción de las soluciones empleadas.....	167
9.3. Análisis de sensibilidad.....	169
9.3.1. Modelos para el análisis de la mejora sísmica.....	169
9.3.2. Modelos para el análisis de la mejora energética.....	170
9.4. Resultados del análisis de sensibilidad.....	171
9.5. Conclusiones.....	174
9.6. Referencias.....	175
10. Evaluación de soluciones integradas de rehabilitación energética y sísmica a través de un índice beneficio-coste	177
<i>Julia Díaz-Borrego, María-Victoria Requena-García-Cruz, Jéssica Fernández-Agüera y Samuel Domínguez-Amarillo</i>	
10.1. Introducción.....	178
10.2. Método para el análisis beneficio-coste.....	178
10.3. Resultados del análisis individual.....	180
10.3.1. Resultados de la mejora energética.....	180
10.3.2. Resultados de la mejora sísmica.....	181
10.4. Resultados del análisis combinado e integrado.....	182
10.5. Conclusiones.....	183
10.6. Referencias.....	184
Índice de tablas	185
Índice de figuras	187

Listado de abreviaturas

AAC	Hormigón celular curado en autoclave de alto rendimiento
Ab	Abreviaturas
B	Beneficio
C	Coste
BRB	Diagonales de pandeo restringido
CFRP	Fibra de carbono reforzada con polímeros
E	Energético
EAL _E	Índice de pérdida energética anual esperada
EAL _S	Índice de pérdida sísmica anual esperada
EPS	Poliestireno expandido
F	Fachadas
LED	Diodo emisor de luz
GFRP	Rejilla de polímeros con fibra de vidrio
MW	Lana mineral
NE	Orientación noreste
NW	Orientación noroeste
OSB	Tablero de virutas orientadas
PEER-PBEE	Metodología de comportamiento sísmico desarrollada por el Centro de Investigación de Ingeniería Sísmica del Pacífico
PGA	Aceleración pico
PR	Paquetes de refuerzo
PR ₁	Paquete de refuerzo 1: huecos de fachada
PR ₂	Paquete de refuerzo 1: muros de fachada
PR ₃	Paquete de refuerzo 3: medidas combinadas
S	Sísmico
SATE	Sistema compuesto de aislamiento térmico exterior
SE	Orientación sureste
SW	Orientación suroeste
TRM	Mortero reforzado con tejidos
VAN	Valor actual neto
W	Ventanas
XPS	Poliestireno extruido

1

RENERSIS, un proyecto para la mejora integral de la eficiencia energética y la seguridad sísmica de edificios existentes

María-Victoria Requena-García-Cruz*, Emilio Romero-Sánchez* y Antonio Morales-Esteban*

* *Departamento de Estructuras de Edificación e Ingeniería del Terreno
Universidad de Sevilla*

RESUMEN

Casi todas las grandes barriadas de Andalucía se construyeron a lo largo del siglo XX. Gran parte de estos edificios se caracterizan por su falta de mantenimiento y su obsolescencia. Esto hace que presenten unas condiciones ambientales muy alejadas de los estándares actuales, afectando a la salud y a la calidad de vida de sus moradores. Esto provoca un mayor consumo energético para el acondicionamiento térmico de las viviendas, lo que genera unos mayores niveles de emisiones de CO₂. Asimismo, gran parte de estos edificios se localizan en zonas que se han visto afectadas por grandes terremotos históricos, que han producido daños considerables en el parque inmobiliario. Por último, destacar que estos edificios presentan vulnerabilidades sísmicas.

Por ello, el proyecto RENERSIS tiene como objetivo la mejora de la eficiencia energética y el comportamiento sísmico de edificios de viviendas en grandes barriadas de antigua construcción en Andalucía. Para ello se diseñan y calculan soluciones integradas que consideren ambos aspectos. Esto se pretende conseguir a partir del diseño y la evaluación de soluciones compatibles, no invasivas y complementarias aplicadas en la fachada de estos edificios. Además, se pretenden realizar en una única actuación y con un incremento de coste mínimo.

En este capítulo, se presentan los objetivos principales, la metodología, los ámbitos y las sinergias del proyecto.

1.1. ANTECEDENTES

Casi todas las grandes barriadas de Andalucía se construyeron a lo largo del siglo XX (Instituto para la diversificación y ahorro de la energía [IDAE], 2011). Como resultado, la mayor parte de estos edificios carecen de aislamiento térmico en su envolvente, o este es insuficiente, ya que hasta 1979 no se establecieron las primeras limitaciones de demanda energética en edificios. Esto da lugar a un mayor consumo energético para el acondicionamiento térmico de las viviendas, lo que supone la generación de mayores niveles de emisiones de CO₂ (Domínguez *et al.*, 2012). Asimismo, estas barriadas tienen un nivel de confort y calidad ambiental muy por debajo de los estándares actuales.

Estos edificios se caracterizan por su falta de mantenimiento y su obsolescencia. Esto hace que presenten unas condiciones ambientales muy alejadas de los estándares actuales, afectando a la salud y a la calidad de vida de sus residentes. En la ciudad de Sevilla, representan el 30% del parque inmobiliario (Domínguez *et al.*, 2012). Además, se caracterizan por acoger en mayor o menor medida a colectivos vulnerables.

En este contexto, recientemente, se ha aprobado el Pacto Verde Europeo (*European Green Deal*) para garantizar que Europa alcance la neutralidad climática en 2050. Para ello, la Comisión Europea ha establecido 50 acciones concretas organizadas en siete líneas prioritarias.

Se estima que el 65% de los edificios europeos en regiones sísmicas necesitan una rehabilitación sísmica. En el caso de Andalucía, la actividad sísmica es notable debido a la cercanía con la zona de contacto entre las placas tectónicas euroasiática y africana (Amaro-Mellado *et al.*, 2017). Dicho contacto se extiende desde las Azores hasta el Mediterráneo pasando por el estrecho de Gibraltar. Los terremotos históricos más importantes que se han producido en la península ibérica afectaron a esta región (1755 [$M_w=9$] y 1969 [$M_w=8$]), con efectos devastadores (Mendes-Victor *et al.*, 2009). Como ejemplo cercano del poder destructivo de un terremoto, se puede citar el reciente terremoto de Lorca de 2011 ($M_w=5,1$), con un parque inmobiliario similar al andaluz, que causó 9 víctimas mortales, más de 300 heridos y el realojo de más de 10 000 personas (Dirección General de Protección Civil y Emergencias, 2015). Se detectaron multitud de daños en edificios residenciales, más de un 13% sufrió daños graves o muy graves, llegándose al 40% en algunos barrios. Además, en España, la primera normativa sísmica de obligado cumplimiento entró en vigor en 1994 (Ministerio de Obras Públicas Transportes y Medio Ambiente, 1994). Antes de esta normativa, existían diversas directrices que no eran restrictivas. Por tanto, las barriadas de antigua construcción andaluzas se diseñaron y construyeron fundamentalmente sin tener en cuenta consideraciones sísmicas.

1.2. MOTIVACIÓN

Este proyecto pretende mejorar la eficiencia energética y el comportamiento sísmico de edificios de viviendas en grandes barriadas de antigua construcción a partir del diseño y el cálculo de soluciones integradas que consideren ambos aspectos. Esto se pretende conseguir a partir del diseño y la evaluación de soluciones compatibles, no invasivas y complementarias aplicadas en la fachada de estos edificios. Además, se busca que se realice en una única actuación y con

un incremento de coste mínimo. Este proyecto se enmarca en las políticas europeas que buscan mejorar el comportamiento energético y reforzando, de forma simultánea, su seguridad estructural, particularmente la sísmica, siendo el primer estudio de este tipo en España y Andalucía.

Se proponen soluciones que en una única actuación conjugan dos aspectos, lo que resulta más económico. Además, cualquier medida de ahorro de energía resulta muy beneficiosa económica y medioambientalmente. Económicamente porque reduce la factura energética del consumidor y afecta a la economía de todo el país (reducción del gasto en importación de energía). Medioambientalmente porque supondrá el ahorro de energía y la disminución de las emisiones de CO₂. Asimismo, en caso de terremoto, el refuerzo sísmico previo de los edificios, genera unos menores costes económicos y medioambientales que la reparación o la reconstrucción.

Las soluciones específicas se cuantificarán por medio de un índice que permitirá valorar conjuntamente el coste, el impacto medioambiental, la mejora de la eficiencia energética y la mejora del comportamiento sísmico. Además, este índice permite fijar un peso relativo a cada uno de los aspectos analizados, permitiendo adaptarlo a las necesidades por parte de un técnico o un gestor público. Para su estudio en detalle, se ha seleccionado La barriada de El Plantinar de Sevilla. Esta barriada es representativa del parque inmobiliario andaluz por lo que las lecciones aprendidas se podrán extrapolar fácilmente a toda Andalucía. Estos edificios se localizan en una zona afectada por grandes terremotos históricos que han producido daños considerables en el parque inmobiliario ya que presentan vulnerabilidades sísmicas. En el proyecto se busca mejorar el comportamiento sísmico de los edificios, para cumplir con los requerimientos actuales, dotando a las familias de una vivienda más segura.

El proyecto aboga por la rehabilitación cuyo modelo económico es más sostenible en el tiempo que el de la obra nueva. El proyecto ayudará a dinamizar la economía local en su conjunto, revalorizando las zonas intervenidas, creando empleo y reduciendo costes. El proyecto se basa en la rehabilitación de edificios desde el punto de vista energético y sísmico. Como resultado se obtienen beneficios sociales y económicos. Estos son inmediatos y tangibles, ya que se regeneran las zonas intervenidas, se mejora la calidad de vida de la población y se arraiga a los residentes en su entorno. Esto hace que la ciudad se mantenga viva, se conserve la identidad por parte de la ciudadanía que la habita y se preserve el patrimonio residencial.

El estudio no solo propone cuestiones relativas al avance científico-técnico, sino que también tiene consecuencias más amplias que afectan a la sociedad y a la región. Además del impacto científico-técnico, la propuesta tiene un importante impacto social, medioambiental y económico. A nivel social, actuar en estas barriadas mejora la integración y reduce las diferencias sociales. A nivel medioambiental, las medidas propuestas están destinadas a rehabilitar energéticamente los edificios lo que supondrá el ahorro de energía y la disminución de emisiones de CO₂. A nivel económico, la rehabilitación dinamizará la economía local en su conjunto, revalorizando las zonas intervenidas, creando empleo y reduciendo costes. La puesta en valor y el correcto mantenimiento de este patrimonio residencial es una apuesta por la sostenibilidad social, cultural, económica y medioambiental. Por último, el impacto más importante de esta propuesta será proporcionar un hogar más digno y seguro a un número importante de familias, lo que supondrá una mejora sustancial de sus vidas.

Este proyecto pretende aportar soluciones novedosas a las materias d), g) y t), competencia de la Secretaría General de Vivienda de la Junta de Andalucía, contempladas en el artículo 7 del Decreto 107/2019, puesto que:

- En relación a la d), el proyecto se basa en el fomento de la rehabilitación de viviendas (siendo consecuentes con su valor patrimonial) y en la mejora de la eficiencia energética, atendiendo a los criterios de sostenibilidad.
- En relación a la g), se proponen soluciones novedosas, teniendo en cuenta el impacto medioambiental, para la mejora de la eficiencia energética, incorporado, además, la reducción de la vulnerabilidad sísmica de estos edificios, optimizando los costes de construcción, rehabilitación y mantenimiento.
- En relación a la t), se fomentan las tipologías arquitectónicas tradicionales con el objetivo de adecuar las viviendas a las nuevas necesidades de la sociedad y a las técnicas constructivas actuales.

1.3. OBJETIVOS Y ALCANCE DEL TRABAJO

El proyecto RENERSIS tiene como objetivo principal el diseño y la cuantificación de las soluciones constructivas más eficaces que conjuguen la mejora energética y del comportamiento sísmico de la fachada de edificios de viviendas en grandes barriadas andaluzas de antigua construcción. Esto se pretende conseguir a partir de soluciones compatibles, no invasivas y complementarias aplicadas en una única actuación y con un incremento del coste mínimo.

Este objetivo principal se pretende conseguir a partir de los siguientes objetivos específicos:

- *Revisión del estado del conocimiento*, a través de la revisión de la bibliografía sobre mejoras sísmicas aplicadas en fachadas y sistemas de mejora de la eficiencia energética de las mismas. Este objetivo permite alcanzar, en primer lugar, una actualización del estado del arte actual con el fin de analizar posibles avances en este campo que sean susceptibles de ser incorporados en la metodología del proyecto.
- *Identificación de los valores y atributos culturales*. Esto permite definir criterios claros de intervención, lo que pone de manifiesto la necesidad de protección y gestión, así como de una intervención patrimonial adecuada.
- *Obtención y validación de las características de los edificios*, para la obtención de los parámetros dimensionales, las características constructivas (con especial atención a los parámetros que afecten al comportamiento energético del edificio), estructurales y geotécnicos. Para poder realizar un estudio detallado de los edificios es necesario tener los datos precisos para realizar los modelos. Los datos se han obtenido y validado con medidas *in situ*, de los proyectos originales, de bases de datos existentes y de estudios científicos similares.
- *Desarrollo computacional y validación del prototipo virtual energético*, para el cálculo posterior de las hipótesis de rehabilitación y la exportación de los parámetros a otros casos analizados. Los edificios objeto de estudio se modelizan tridimensionalmente para el desarrollo de simulaciones energéticas avanzadas a fin de caracterizar su comportamiento energético y evolución dinámica. Este modelo se valida con los resultados de caracterización *in situ* obtenidos.

- *Obtención de un modelo de comportamientos sísmico del edificio.* En primer lugar, se determina la acción sísmica a partir de la norma sismo-resistente española, europea y los mapas de peligrosidad actualizados. En segundo lugar, los edificios se modelan en tres dimensiones y se realizará un análisis estático no lineal para determinar su vulnerabilidad sísmica.
- *Desarrollo e implementación de las soluciones constructivas investigadas,* con objeto de cuantificar la mejora que las soluciones propuestas producen en los edificios.
- *Determinación del índice energético-sísmico,* que combina el coste, el impacto medioambiental, la mejora de la eficiencia energética y la mejora del comportamiento sísmico de los edificios. Para ello a los resultados del modelo energético y sísmico, se le sumará la obtención del impacto medioambiental y la obtención del coste de implementar las soluciones. Esta herramienta es fundamental para la toma de decisiones ya que es la que permite la obtención de las soluciones más eficaces.
- *Difusión de los resultados.* Los resultados se divulgarán mediante la publicación de congresos y artículos en revistas indexadas en el *Journal Citation Reports*.
- *Elaboración de un libro práctico.* El objetivo es que los resultados del proyecto se condensen en un libro donde se incluyan la metodología, las herramientas de validación y los resultados de una manera desarrollada para que puedan ser fácilmente extrapolables y utilizables por la administración y técnicos en general.

1.4. METODOLOGÍA

La metodología de trabajo da respuesta a los objetivos propuestos y se pormenoriza en las siguientes acciones establecidas en la tabla 1.1:

Tabla 1.1. Acciones que componen la metodología seguida en el proyecto

Acción 1	Revisión del estado del conocimiento
Acción 1.1	Revisión de la bibliografía actual sobre los sistemas de mejora de la eficiencia energética y sísmica de fachada
Acción 1.2	Análisis de la metodología y de las conclusiones obtenidas en trabajos similares
Acción 2	Obtención de los valores patrimoniales de la barriada analizada
Acción 2.2	Revisión bibliográfica y contextualización de los edificios a partir de la información disponible en archivos y bases de datos
Acción 2.2	Análisis patrimonial de la barriada analizada
Acción 3	Caracterización energética y estructural de los edificios
Acción 3.1	Realización de inspecciones visuales y mediciones <i>in situ</i> para obtener las características y parámetros energéticos y determinar el estado de conservación de los edificios
Acción 3.2	Medición <i>in situ</i> de perfiles térmicos reales y operacionales
Acción 3.3	Determinación de los parámetros dimensionales y las características constructivas, estructurales y geotécnicas
Acción 3.4	Actualización de la base de datos de edificios

Acción 4	Desarrollo computacional y validación del prototipo virtual energético (escenario original)
Acción 4.1	Simulación dinámica del comportamiento energético con las predicciones meteorológicas
Acción 4.2	Modelizado tridimensional de los edificios con las condiciones del contorno
Acción 4.3	Calibración y validación de los modelos a partir de los resultados de la caracterización <i>in situ</i> obtenida
Acción 5	Obtención del modelo de comportamiento sísmico del edificio (escenario original)
Acción 5.1	Determinación de la acción sísmica a partir de la norma sismo-resistente española, europea y los mapas de peligrosidad actualizados
Acción 5.2	Modelizado de los edificios con OpenSees (McKenna <i>et al.</i> , 2000) y STKO (Petracca <i>et al.</i> , 2017) según la caracterización elaborada anteriormente
Acción 5.3	Realización de análisis estáticos no lineales para determinar su capacidad sísmica
Acción 5.4	Calibración y validación de modelos comparando la frecuencia natural de los edificios simulada y observada
Acción 5.5	Análisis de la seguridad sísmica según el Eurocódigo-8 y el anexo español
Acción 6	Desarrollo e implementación de las soluciones constructivas investigadas (escenario rehabilitado)
Acción 6.1	Elaboración de soluciones de mejora energética y sísmica integradas y adaptadas a los edificios
Acción 6.2	Obtención del comportamiento energético y sísmico de los modelos tras implementar las soluciones de mejora
Acción 7	Determinación del índice energético-sísmico
Acción 7.1	Cuantificación del coste económico
Acción 7.2	Cuantificación del impacto medioambiental
Acción 7.3	Cuantificación de la mejora energética
Acción 7.4	Cuantificación de la mejora sísmica
Acción 7.5	Determinación de la solución de mejora más eficaz según los distintos aspectos analizados
Acción 8	Difusión de los resultados
Acción 8.1	Publicación de la metodología y de los resultados del proyecto en revistas indexadas de alto factor de impacto y en un congreso internacional
Acción 8.2	Realización de una jornada internacional en línea para investigadores
Acción 8.3	Realización de una jornada formativa destinada a profesionales
Acción 9	Elaboración de un libro práctico
Acción 9.1	Redacción y publicación de un libro práctico que incluya las herramientas de análisis, la metodología, los detalles estudiados y los resultados en detalle obtenidos de la investigación para que puedan ser fácilmente extrapolables y utilizables por la administración y técnicos en general

1.5. ÁMBITOS DEL PROYECTO

El método, el diseño y el plan de trabajo para alcanzar los objetivos se justifican desde los siguientes ámbitos:

- *Técnico*: la propuesta se centra en soluciones que afecten a la fachada de los edificios, entendida como el cerramiento y los huecos. Estas son compatibles con la mejora de la envolvente completa de los edificios. El proyecto tiene un claro carácter multidisciplinar, abarcando distintas áreas.
- *Urbanístico*: las soluciones que se propondrán se adosarán a la fachada de los edificios, no modificando sustancialmente los mismos. Por tanto, son compatibles con el planeamiento vigente.
- *Medioambiente*: el proyecto pretende que las soluciones permitan el ahorro de energía y la disminución de emisiones de CO₂ de las viviendas. Además, se cuantificará la ecoeficiencia de las propuestas, usando el análisis de ciclo de vida.
- *Económico*: el proyecto aboga por la rehabilitación, más económica que la obra nueva. Las soluciones se realizarán en una única actuación conjugando dos aspectos, lo que resulta más económico. Se ayudará a dinamizar la economía local en su conjunto, revalorizando las zonas intervenidas, creando empleo y reduciendo costes (energéticos y económicos). Se cuantificará el coste económico de las soluciones.

1.6. COMPLEMENTARIEDAD Y SINERGIAS

El proyecto da respuesta a varios de los objetivos y prioridades planteados por la Agenda Urbana de Andalucía (Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio, 2018), el Plan Vive en Andalucía 2020-2030 (Consejo de Gobierno de la Junta de Andalucía, 2020) y el PAIDI 2020 (Consejería de Economía y Conocimiento de la Junta de Andalucía, 2014) ya que se busca que desde la arquitectura se mejore la calidad de vida de las personas desde una perspectiva de sostenibilidad social y ambiental. Desde el punto de vista social, el proyecto persigue garantizar el derecho al disfrute de una vivienda digna y segura, abarcando las necesidades y tendencias actuales. Desde el punto de vista ambiental, el proyecto persigue la reducción del consumo energético, del uso de recursos, de la huella ecológica, considerando el ciclo de vida de los materiales. Además, aborda una problemática común a muchos países, que es el aumento de la sostenibilidad y de la seguridad de la vivienda. Por ello, la ONU-Habitat estableció en la Agenda 2030 (Asamblea General Naciones Unidas, 2015) un conjunto de objetivos globales entre los que se aboga por el desarrollo sostenible.

Además, el proyecto se enmarca en la prioridad 2 de la Secretaría General de Vivienda de la Junta de Andalucía (Actuaciones de rehabilitación residencial, destacando las intervenciones sobre edificios residenciales de viviendas colectivas en Andalucía, en especial los localizados en grandes barriadas de antigua construcción poniendo de relieve aspectos tales como la accesibilidad, la conservación y el mantenimiento y la sostenibilidad). El proyecto se centra en estas barriadas y da respuesta al correcto mantenimiento, la conservación y la sostenibilidad desde el punto de vista energético y sísmico.

La propuesta también entronca firmemente con la prioridad 3 (Vivienda y Arquitectura, incluyendo los aspectos de sostenibilidad y de la eficiencia energética, fomentando la racionalización de las intervenciones y los nuevos modos de convivencia, con especial atención a la vivienda social) ya que se promueve:

- La sostenibilidad, al aportarse soluciones que satisfacen las necesidades actuales sin comprometer la capacidad de generaciones futuras de satisfacer las suyas.
- La eficiencia energética al proponerse soluciones para su mejora.
- Se fomenta la racionalización de las intervenciones al permitir en una única intervención la mejora energética y sísmica reduciendo el coste notablemente.

Además, el proyecto también da respuesta a la prioridad 4 (Catalogación, diagnóstico y metodologías para la protección y conservación del Patrimonio Arquitectónico) ya que se proponen metodologías para el análisis energético y sísmico del patrimonio arquitectónico residencial construido. Estas metodologías desembocan en soluciones que permiten la intervención en dicho patrimonio arquitectónico conservando sus valores y atributos patrimoniales. Esta política de vivienda es más sostenible que la de nueva construcción: se genera un menor coste e impacto y se aprovechan y se revalorizan recursos existentes, así como se mantiene la cuestión identitaria por parte de la ciudadanía que la habita.

Asimismo, el proyecto da respuesta a los siguientes objetivos estratégicos de la Consejería de Fomento, Infraestructuras y Ordenación del Territorio de la Junta de Andalucía:

- Hacer real y efectivo el derecho a una vivienda digna y adecuada en condiciones de igualdad en Andalucía. El proyecto busca la rehabilitación de edificios mejorando las condiciones de habitabilidad y seguridad de sus habitantes.
- Fomento de la investigación e innovación en materia de vivienda, arquitectura y ciudad. Se proponen soluciones innovadoras para mejorar las condiciones de vida de la ciudadanía.

1.7. REFERENCIAS

- Amaro-Mellado, J. L., Morales-Esteban, A. y Martínez-Álvarez, F. (2017): «Mapping of seismic parameters of the Iberian Peninsula by means of a geographic information system», *Central European Journal of Operations Research*. <https://doi.org/10.1007/s10100-017-0506-7>
- Asamblea General Naciones Unidas (2015): *Resolución aprobada por la Asamblea General el 25 de septiembre de 2015*. https://unctad.org/system/files/official-document/ares70d1_es.pdf
- Consejería de Economía y Conocimiento de la Junta de Andalucía (2014): *Plan Andaluz de Investigación, Desarrollo e Innovación 2020 (PAIDI)*. España. <https://www.juntadeandalucia.es/organismos/transparencia/planificacion-evaluacion-estadistica/planes/detalle/86940.html>
- Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio (2018): *Agenda Urbana de Andalucía*. España. https://www.juntadeandalucia.es/export/drupaljda/02_agenda_urbana_andalucia_2030.pdf
- Consejo de Gobierno de la Junta de Andalucía (2020): *Estrategia de Innovación de Andalucía 2020*. España. <https://www.juntadeandalucia.es/export/drupaljda/Documento-Ris3-version-final-8-27-02-15.pdf>
- Dirección General de Protección Civil y Emergencias (2015): *Lorca resiliente: lecciones aprendidas de un terremoto*. Secretaría General Técnica. Ministerio del Interior. España. https://www.interior.gob.es/opencms/pdf/archivos-y-documentacion/documentacion-y-publicaciones/publicaciones-descargables/proteccion-civil/Lorca_Resiliente_126150337.pdf

- Domínguez, S., Sendra, J. J., León, A. L. y Esquivias, P. M. (2012): «Towards Energy Demand Reduction in Social Housing Buildings: Envelope System Optimization Strategies», *Energies*, 5(7), 2263-2287. <https://doi.org/10.3390/en5072263>
- Instituto para la diversificación y ahorro de la energía (IDAE) (2011): *Proyecto SECH-SPAHOUSEC. Análisis del consumo energético del sector residencial en España. Informe Final*. España. <https://docplayer.es/24336-Analisis-del-consumo-energetico-del-sector-residencial-en-espana.html>
- McKenna, F., Fenves, G. L. y Scott, M. H. (2000): *OpenSees: Open system for earthquake engineering simulation. Pacific Earthquake Engineering Research Center*. University of California. <https://opensees.berkeley.edu/>
- Mendes-Victor, L. A., Oliveira, C. S., Azevedo, J. y Ribeiro, A. (2009): «The 1755 Lisbon Earthquake: Revisited». En *Geotechnical, Geological and Earthquake Engineering* (vol. 7, pp. 221-231). <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8609-0>
- Ministerio de Obras Públicas Transportes y Medio Ambiente (1994): *Norma de Construcción Sismorresistente: Parte General y Edificación (NCSE-94)*. España. <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-1995-3319>
- Petracca, M., Candeloro, F. y Camata, G. (2017): «*STKO user manual*». *ASDEA Software Technology*. Italia. <https://asdeasoft.net/pdf/STKOUserManual.pdf>

2

Eficiencia energética y vulnerabilidad sísmica del parque edificatorio actual. El caso de Andalucía

Emilio Romero-Sánchez*, M. Pilar López Piña*,
María-Victoria Requena-García-Cruz* y Antonio Morales-Esteban*

* *Departamento de Estructuras de Edificación e Ingeniería del Terreno
Universidad de Sevilla*

RESUMEN

Gran parte del parque edificado europeo está culminando su vida útil. Se trata de edificios envejecidos, con materiales constructivos degradados y que fueron construidos en su mayoría antes de la aplicación de códigos constructivos y estructurales restrictivos. Esto hace que su comportamiento sísmico y energético sea pobre o inadecuado, no llegando a cumplir con los estándares mínimos de seguridad y confort.

En este capítulo, se analiza la situación del parque inmobiliario a nivel europeo, en España y el caso concreto de Andalucía, con respecto a su comportamiento energético y a su vulnerabilidad sísmica. Se indica que pese a que el estado de conservación de los edificios a nivel nacional y andaluz es bueno, los edificios situados en grandes barriadas de antigua construcción presentan deficiencias considerables. Se concluye que al realizar una rehabilitación combinada del comportamiento energético y sísmico, es posible desarrollar prácticas sostenibles que podrían resultar en una reducción del impacto ambiental, económico y en una mejora social.

2.1. NIVEL EUROPEO

La mayor parte de los edificios existentes en la Unión Europea (UE) están llegando al fin de su vida útil (Pohoryles *et al.*, 2020), que en el caso de España, se establece en 50 años. Esto conlleva a una degradación importante de sus elementos estructurales y no-estructurales, así como de sus materiales constructivos. Asimismo, el 80% del parque residencial europeo se construyó antes de la implementación de estándares constructivos y estructurales (Ibáñez Iralde *et al.*, 2021). Por tanto, además del envejecimiento y degradación de estas estructuras, la mayor parte se construyó principalmente siguiendo normativas obsoletas o mucho antes de la aplicación de códigos constructivos restrictivos. Esto hace que sus comportamientos sísmico y energético sea pobre o inadecuado, no llegando a cumplir con los estándares mínimos de confort (Menna *et al.*, 2021). De hecho, el consumo energético de edificios residenciales es de hasta el 40% del total de la energía consumida por la UE (Instituto para la diversificación y ahorro de la energía [IDAE], 2011). Igualmente, el sector de la construcción genera el 36% de las emisiones de CO₂ del total producido a nivel europeo (European Commission, 2012).

Asimismo, y debido a la fecha de construcción de estos edificios, la mayor parte de las estructuras situadas en regiones sísmicas de peligrosidad media-alta no se construyeron para resistir los esfuerzos sísmicos. De hecho, se estima que al menos el 40% de estas estructuras pueden llegar a colapsar parcial o totalmente (Bournas, 2018). Por tanto, la seguridad sísmica de estas estructuras no siempre está garantizada, como se ha podido observar en el nivel de daño y en las pérdidas sísmicas producidas tras terremotos recientes sufridos en Europa (Indirli *et al.*, 2013; Sorrentino *et al.*, 2019).

Se estima que al menos el 65% del parque edificatorio europeo ubicado en regiones sísmicas necesita ser rehabilitado energética y sísmicamente para cumplir con los objetivos mínimos establecidos en la normativa actual (Instituto para la diversificación y ahorro de la energía [IDAE], 2011). Por ello, la UE y los gobiernos nacionales han mostrado interés en la mejora de la eficiencia energética y en el refuerzo sísmico del parque inmobiliario. En este contexto, la UE aprobó el acuerdo denominado *Green Deal* para lograr la neutralidad climática en 2050 (European Parliament, 2019). Para ello, la UE ha establecido recientemente programas de rehabilitación de edificios residenciales centrados en la mejora de la eficiencia energética, con el objetivo último de reducir el riesgo de pobreza energética. Además, la UE ha creado nuevas directrices para la reducción del consumo de energía, así como para la gestión de las emisiones de CO₂, estableciendo al menos un 32,5% como objetivo de mejora de la eficiencia energética en el año 2030 (European Parliament, 2019).

A pesar de invertir importantes recursos económicos para la reducción del consumo de energía y de las emisiones contaminantes, la seguridad sísmica se ha omitido habitualmente en las actividades de rehabilitación. Aun así, recientemente se han firmado varios acuerdos para la reducción del riesgo sísmico, como el acuerdo marco de Sendai para la Reducción del Riesgo de Desastres 2015-2030 (United Nations, 2015). En este acuerdo, se incide en la importancia de la ciencia y la tecnología para la toma de decisiones en la reducción del riesgo de desastres (Freddi *et al.*, 2021). También se destaca la necesidad de desarrollar nuevos tipos de análisis y metodologías sobre la rehabilitación sísmica de estructuras existentes para mejorar la seguridad y la resiliencia ante terremotos. En este sentido, a nivel europeo, se propuso el Eurocódigo-8 (EC8)

como una herramienta de homogeneización para estandarizar la evaluación y los objetivos del rendimiento sísmico (Requena-García-Cruz *et al.*, 2021). Por su parte, la agencia americana *Federal Emergency Management Agency* (FEMA) desarrolló una metodología independiente basada en la integración de la rehabilitación energética con el diseño de edificios sísmicos basados en el rendimiento para edificios nuevos y existentes (Menna *et al.*, 2022).

2.2. NIVEL ESPAÑA

En España, el consumo de energía de las viviendas supone alrededor del 20 % del consumo total del país y se ha observado un crecimiento ascendente y sostenido durante los últimos 15 años (Domínguez *et al.*, 2012). Este bajo rendimiento se debe principalmente de la falta de aislamiento de paredes y cubiertas, el bajo rendimiento de los sistemas de climatización o la ineficaz exposición al sol. Además, en España, el 93 % de los edificios residenciales se construyeron antes de la primera Directiva de Eficiencia Energética de los Edificios nacional y solo el 0,3 % de los edificios residenciales existentes han sido rehabilitados energéticamente (Ibáñez Iralde *et al.*, 2021).

En este contexto, el programa nacional PRE5000 (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, 2021) tiene como objetivo promover la rehabilitación energética para, en definitiva, reducir el consumo energético y las emisiones de CO₂ del parque edificatorio. Para ello, las actividades de rehabilitación energética están financiadas por el fondo UE-*Next Generation* y en el marco del Plan Español de Recuperación, Transformación y Resiliencia.

Con respecto a Europa, en 2021 España consumía el 7,8 % del total de la energía en el continente (figura 2.1[a]), según el estudio realizado en (Agencia Andaluza de la Energía, 2020). Andalucía equivale al 1,2 % del consumo total del conjunto de los estados miembros de la UE. Según el estudio realizado en (Instituto Nacional de Estadística, 2008), el consumo de la electricidad en los hogares de la UE durante el período 1994-2006 creció un 19,8 %. En el caso de España el indicador se incrementó un 68,3 %, contando con una tasa de crecimiento anual acumulativa de un 4,4 %, superior a la de la UE, cifrada en un 1,5 %. En 2015, el consumo de energía de edificios residenciales en España estaba por debajo de la media de la UE según (EU Building Stock Observatory, 2015) (figura 2.1[b]). Sin embargo, estos valores de consumo son muy superiores a los valores límite establecidos en las normativas y directivas. Además, estos cálculos se realizaron con un clima normal para evitar variaciones climáticas de un año a otro, y por tanto, tener tendencias constantes.

La evolución de la certificación energética en España desde la publicación del Real Decreto sobre eficiencia energética de edificios (RD/235/2013) (Ministerio de la Presidencia, 2013) se ha incrementado en un 1350 % para edificios nuevos (Instituto para la diversificación y ahorro de la energía [IDAE], 2020). En el caso de edificios existentes, la tendencia es igualmente al alza, llegando hasta un incremento del 700 %, con 4,5 millones de certificaciones en diciembre de 2020. Los porcentajes de incrementos son análogos si el estudio se centra solo en la tipología de vivienda. Sin embargo, el nivel de certificaciones energéticas realizadas en España es muy inferior con respecto al resto de países europeos como se puede comprobar en la figura 2.2.

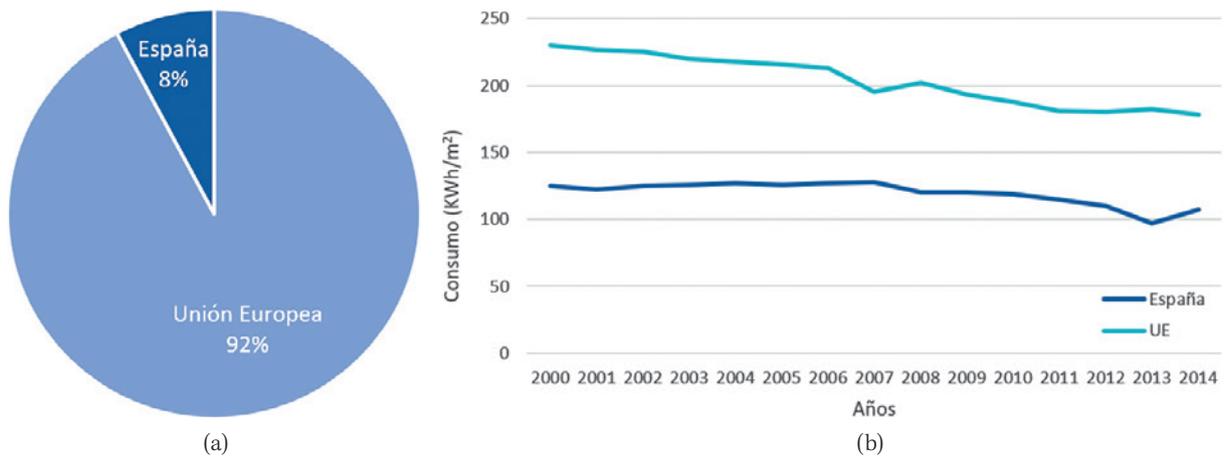


Figura 2.1. (a) Consumo de energía en España respecto al consumo total de Europa; (b) Consumo en kilos de petróleo en España y Europa por año

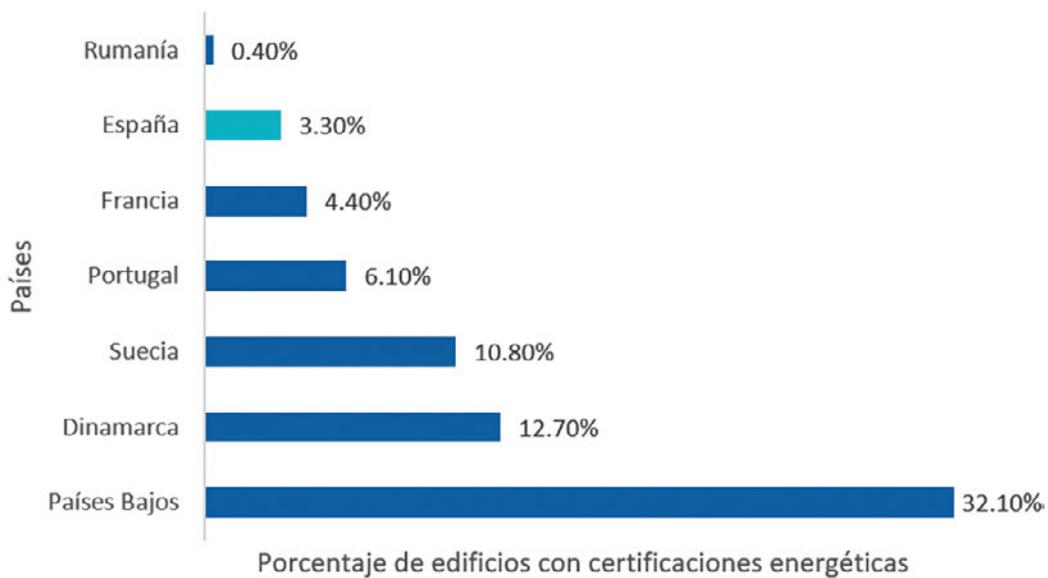


Figura 2.2. Porcentaje de edificios residenciales con certificado de eficiencia energética según diversos países europeos

En relación a la sismicidad, los terremotos son el desastre natural que históricamente ha causado más daños y pérdidas en el patrimonio cultural de los países (Oliveira, 2003). Ejemplos recientes del potencial destructor que puede llegar a tener un terremoto sobre el patrimonio cultural han sido los casos de L'Aquila (Italia, 2009) y de Lorca (Murcia, 2011). En la ciudad italiana, los efectos del terremoto fueron catastróficos y el coste total de los daños producidos en los edificios se estimó en 56 mil millones de dólares (Miyamoto, 2009). En el caso del terremoto de Lorca, los daños producidos específicamente sobre el patrimonio histórico se valoraron en 50 millones de euros y se vieron afectados 29 edificios patrimoniales (Institut Geològic de Catalunya, 2011). En total, se estima que el 40 % de las barriadas residenciales de Lorca fueron dañadas severamente, dando lugar a un alto coste económico (Ruiz-Pinilla *et al.*, 2016).

La península ibérica se caracteriza por una actividad sísmica moderada con respecto a otras regiones del mundo (Carre y Zornoza, 2011). Sin embargo, en el sur de la Península se concentra una actividad sísmica considerable ($M_w \geq 6$) (Morales-Esteban *et al.*, 2014) (figura 2.3). Esto es debido a la convergencia entre las placas tectónicas euroasiática y africana, que se extiende a lo largo del Mediterráneo y del estrecho de Gibraltar hasta las islas Azores.

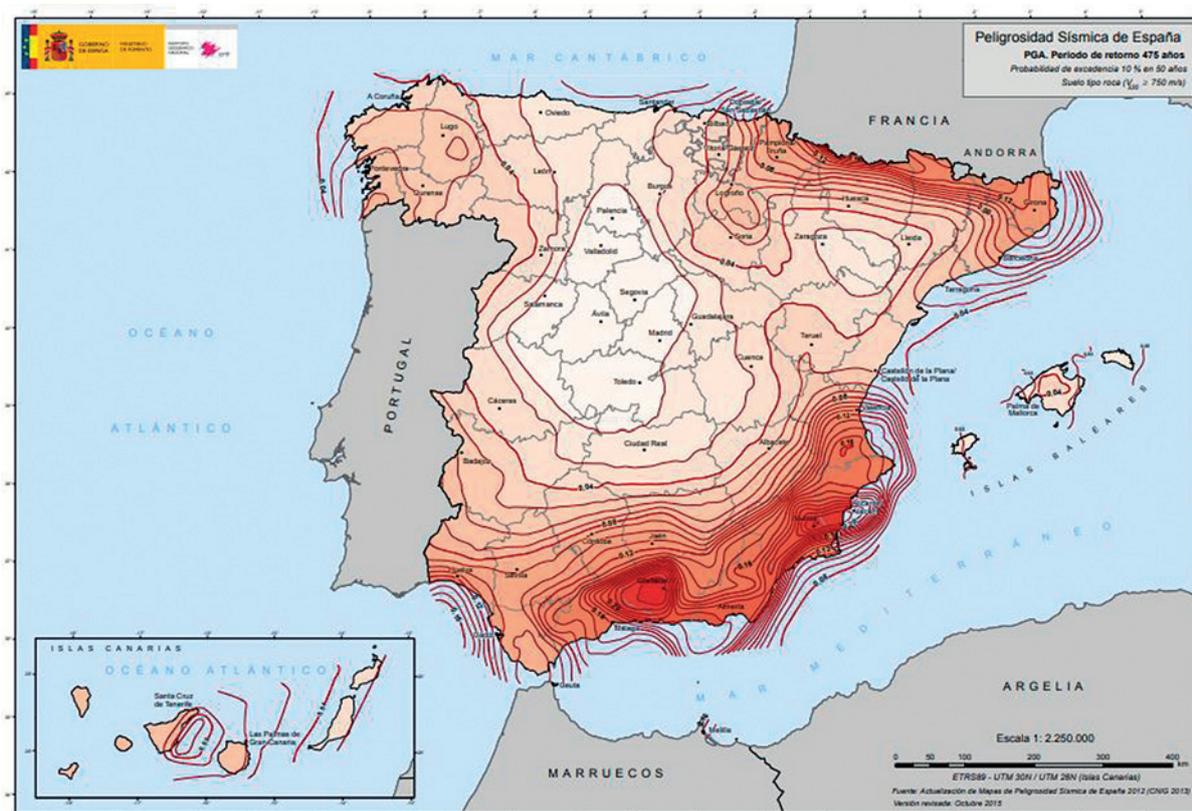


Figura 2.3. Mapa de peligrosidad sísmica de España 2015 (Instituto Geográfico Nacional, s. f.)

2.3. EL CASO DE ANDALUCÍA

Aunque el estado de conservación de los edificios de Andalucía es aceptable en términos generales, un análisis más pormenorizado permite determinar deficiencias en el parque residencial (Junta de Andalucía, 2016). Estas deficiencias están fundamentalmente vinculadas a la eficiencia energética y la accesibilidad de edificios localizados en grandes barriadas de antigua construcción. Además, en estas se concentra una población envejecida y que atraviesa problemas socio-económicos graves.

Según el Instituto Nacional de Estadística (INE), cerca del 40 % de las viviendas en Andalucía fueron construidas en el período 1951-1980 (Instituto Nacional de Estadística, 2022), localizándose la mayoría de estas en las barriadas residenciales en las periferias de las principales ciudades andaluzas (figura 2.4). A pesar de su antigüedad, en (Junta de Andalucía, 2016) se establece que el 92,2% de los edificios residenciales en Andalucía se encuentran en «buena» situación.

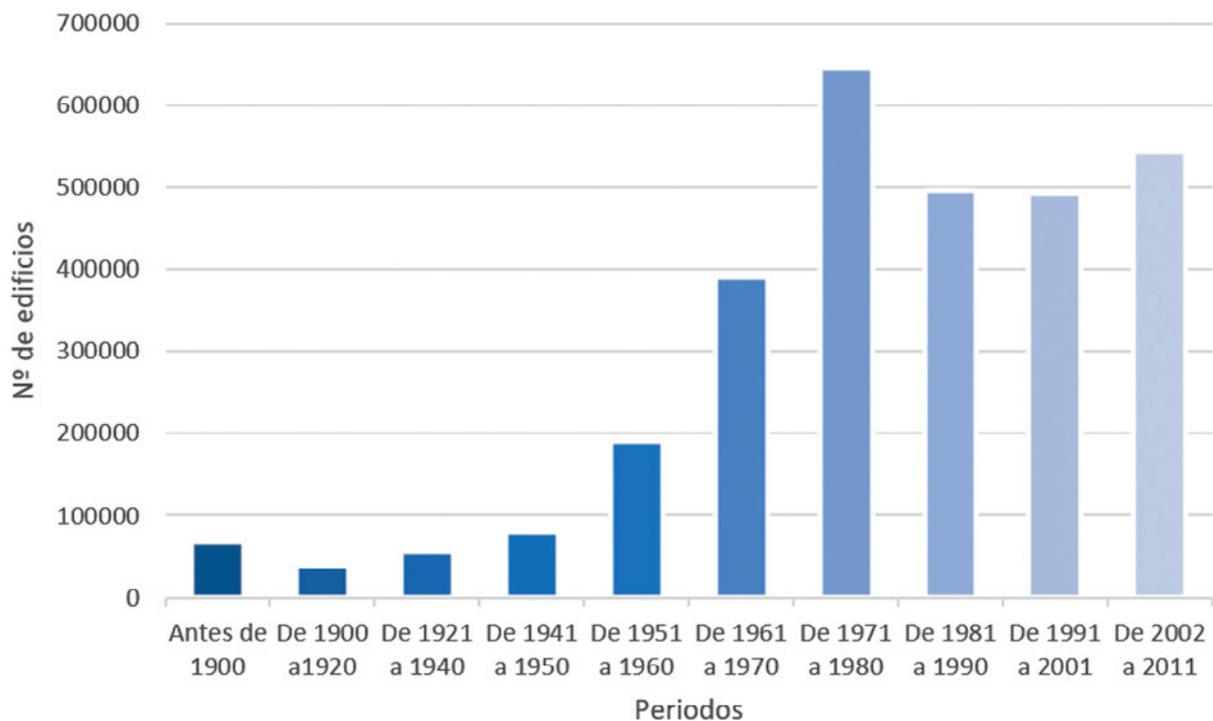


Figura 2.4. Edificios construidos en Andalucía según el año de construcción (Instituto Nacional de Estadística, 2022)

El 7,8% del total se encuentra en un estado «ruinoso», «malo» o «deficiente», dos puntos por debajo de la media nacional.

Debido a la fecha de su construcción, la mitad del parque residencial andaluz (49%) es anterior a las primeras normativas técnicas que regulan las exigencias en materia de eficiencia energética y seguridad sísmica. Se establece que tan solo el 9% de los edificios residenciales han sido construidos tras la entrada en vigor de la norma de construcción sismorresistente española (NCSE-02) (Ministerio de Fomento de España, 2002) y el Código Técnico de la Edificación (CTE) (Ministerio de Fomento, 2006).

2.3.1. Consumo y comportamiento energético

En Andalucía, el petróleo continúa siendo la fuente energética más consumida seguido del gas natural, cuyo consumo se ha incrementado en los últimos años (Agencia Andaluza de la Energía, 2020). El consumo del carbón ha disminuido frente al de energías renovables que ha aumentado, al igual que el de energía nuclear (aunque en Andalucía, la aportación nuclear es mínima). El consumo de energía primaria disminuyó en Andalucía un 15,1% en 2020, debido fundamentalmente al impacto del COVID-19 y a la reducción del consumo de fuentes fósiles para generación eléctrica (figura 2.5[a]). El transporte y la industria registran las mayores reducciones, un 23,8% y un 10,8%, respectivamente. Disminuye en menor medida el consumo del sector servicios (un 6,9%) y ligeramente (0,7%) el del sector primario (figura 2.5[b]). El consumo en el sector residencial aumenta un 0,2% en 2020, que representa un 18% del consumo total.

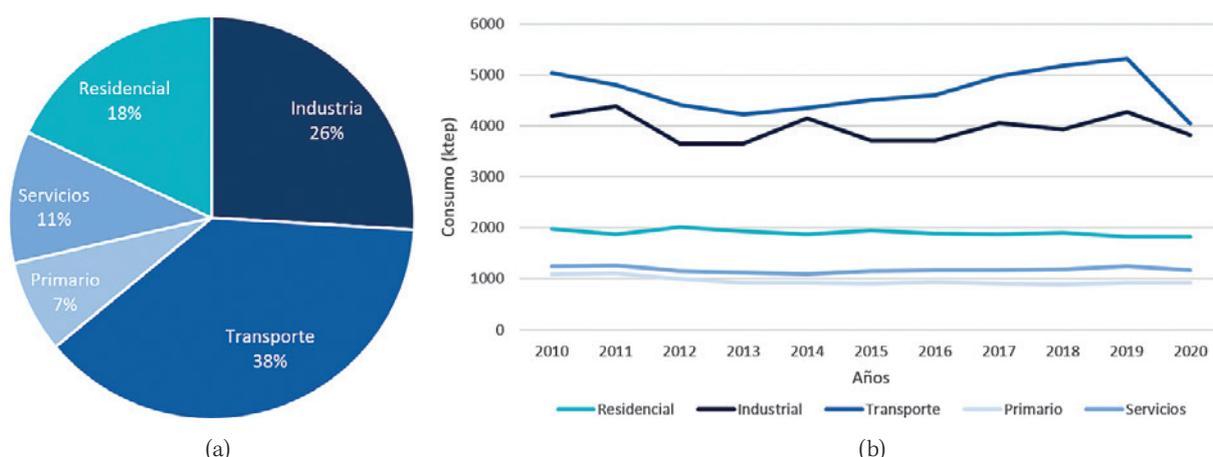


Figura 2.5. (a) Consumo en kilos de petróleo por sector y año; (b) Estructura del consumo de energía final por sectores en 2020

Por fuentes, aumenta el consumo de electricidad un 6,2% y el de la energía solar térmica (2%). Se reduce drásticamente el consumo de gasóleo (47,3%) y, en menor medida, el de gas natural (10,9%), biomasa (5,9%) y gases licuados del petróleo (4,5%). En porcentaje sobre el consumo total del sector, la energía eléctrica supone el 64,8% seguida de los gases licuados del petróleo y la biomasa (figura 2.6[a]). El 10,6% restante se cubre con gas natural, gasóleo y energía solar térmica.

Con respecto a las emisiones de CO₂, en 2020 en Andalucía se marcó un mínimo histórico absoluto, batiendo el dato del año anterior (figura 2.6[b]). Esta mejoría se debe a la situación coyuntural de reducción del consumo como consecuencia, entre otras, de las restricciones de movilidad y la disminución de la producción eléctrica con fuentes fósiles. Sin embargo, estos valores están por encima de los estándares establecidos en las normativas y directrices europeas. Según los datos relativos a las calificaciones energéticas en emisiones y consumo energético de edificios existentes, se establece que Andalucía es la cuarta comunidad autónoma con peores

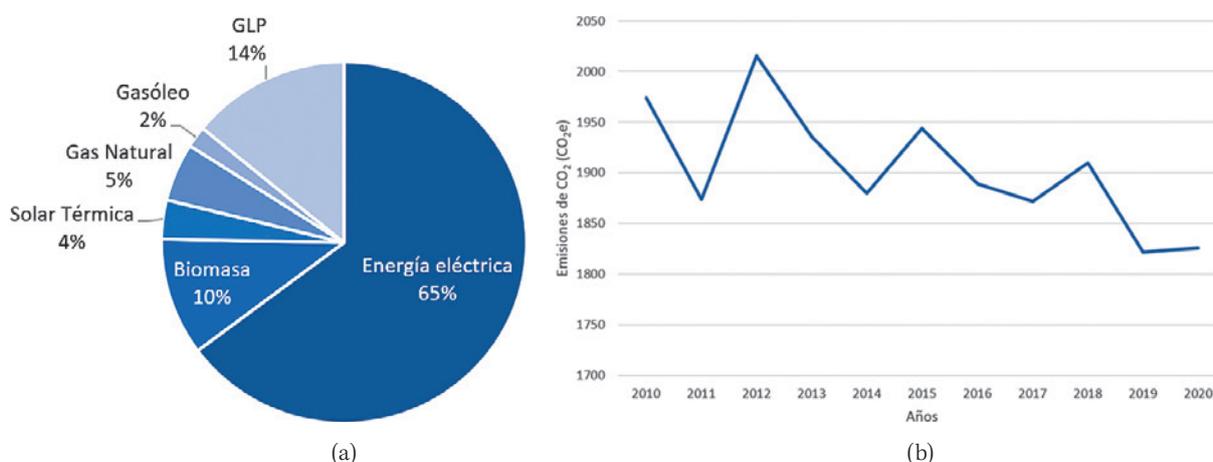
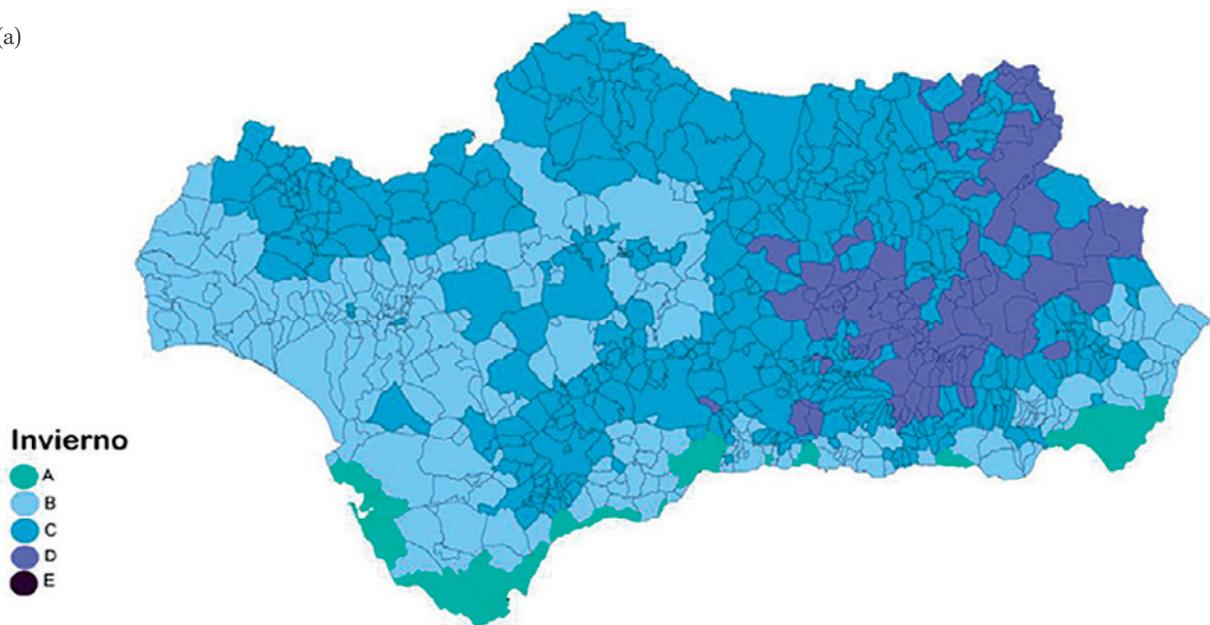


Figura 2.6. (a) Distribución del consumo del sector residencial andaluz por fuentes en 2020; (b) Evolución de la producción de emisiones de CO₂ en Andalucía

datos, por detrás de Madrid, Cataluña y Valencia (Instituto para la diversificación y ahorro de la energía [IDAE], 2020).

Con respecto a la zonificación climática, el CTE en el documento Ahorro de Energía (HE) establece las zonas climáticas de las 50 capitales de provincia y de las ciudades autónomas de Ceuta y Melilla. En (Ministerio de la Vivienda, 2008) se establecen las diferentes zonas climáticas de los 770 municipios andaluces tras la solicitud de la propia comunidad autónoma. Estas zonas se pueden emplear para los supuestos previstos en el CTE. Las zonas climáticas para los municipios de Andalucía se presentan mediante dos mapas en las situaciones de invierno (figura 2.7[a]) y verano (figura 2.7[b]). Esta zonificación se desarrolla a partir de los datos establecidos en el CTE-HE y de registros de horarios de variables climáticas como la temperatura, la radiación, etc.

(a)



(b)

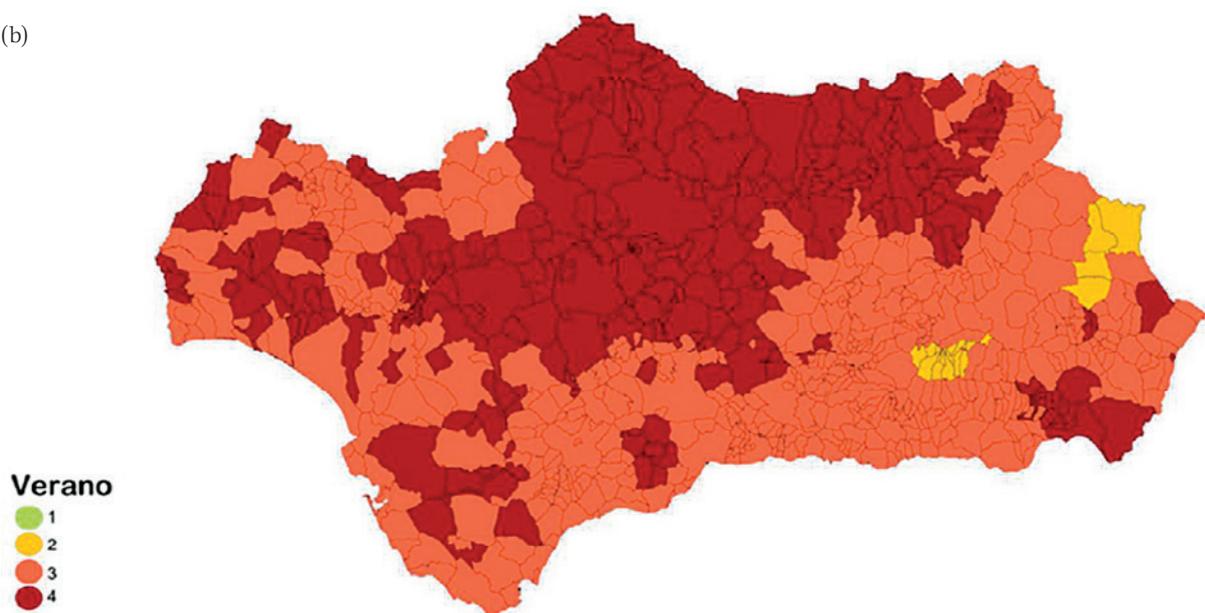


Figura 2.7. Zonificación climática para los municipios andaluces para la situación de (a) invierno y (b) verano

Los edificios residenciales en grandes barriadas de antigua construcción se caracterizan por un comportamiento energético pobre, debido fundamentalmente al año de construcción (Instituto para la diversificación y ahorro de la energía [IDAE], 2011). Esto se ve reflejado en los altos porcentajes de consumo energético y de emisiones de CO₂, que son muy superiores a lo establecido en las normativas. Debido al año de construcción, estos edificios se caracterizan por la ausencia de diseño y de medidas específicas para lograr niveles óptimos de consumo energético y de emisiones (Domínguez *et al.*, 2012). Además, estos edificios son habitados por una población de nivel económico bajo.

Es importante indicar que el factor más importante en el control del consumo energético es la energía empleada en climatizar los edificios (calor-frío), que en España representa el 47,8% de la energía total consumida por el sector de la construcción (Instituto para la diversificación y ahorro de la energía [IDAE], 2011).

2.3.2. Seguridad sísmica

Peligrosidad, vulnerabilidad y riesgo sísmico

La peligrosidad sísmica se define como la probabilidad de excedencia de una cierta intensidad del movimiento del suelo producido por un terremoto en un emplazamiento determinado y durante un período de tiempo dado (Benito y Jiménez, 1999).

Esta peligrosidad se puede expresar en términos de intensidad macrosísmica, relacionada con la capacidad destructiva del terremoto o precisando más, en función de los parámetros propios del movimiento, como son el desplazamiento, la velocidad, y la aceleración, siendo esta última la más habitual.

Para determinar la peligrosidad sísmica existen tres tipos de métodos: los deterministas, los probabilistas y los híbridos. Los métodos deterministas consideran que los terremotos que se producirán en el futuro serán análogos a los ocurridos en el pasado. Los métodos probabilistas hacen una predicción de los terremotos que se pueden esperar en una zona concreta. Partiendo de la información de los fenómenos ocurridos en dicha zona, los métodos probabilistas determinan las funciones de probabilidad de superación de algún parámetro sísmico, o inversamente, el período de retorno en el que se espera que dicho parámetro alcance un nivel de referencia (Barbat y Pujades, 2004). Como combinación de ambos métodos (determinista y probabilista) surgen los métodos híbridos, que consideran dos tipos de fuentes sísmicas: las zonas sismogénicas y la presencia de grandes fallas activas (Martínez-Álvarez *et al.*, 2015).

Por otra parte, se define la vulnerabilidad sísmica como el grado de daño que puede sufrir un edificio, ocasionado por un sismo de determinadas características. La vulnerabilidad se valora en una escala que va desde un grado de daño nulo hasta el colapso del edificio. Es, por tanto, una propiedad intrínseca de cada edificio e independiente de la peligrosidad del emplazamiento. Existen varios métodos para determinar la vulnerabilidad de un edificio frente al sismo. Unos son subjetivos y consisten en la observación de los daños ocurridos en las estructuras por la acción de un terremoto y otros se basan en el cálculo analítico de modelos de estructuras bajo la acción de fuerzas dinámicas (Barbat *et al.*, 1994).

Por último, el riesgo sísmico se define como las consecuencias sociales y económicas potenciales provocadas por un terremoto, como resultado del fallo de la estructura cuya capacidad resistente es superada por dicho terremoto. Por lo tanto, el riesgo sísmico depende directamente de la peligrosidad y de la vulnerabilidad, es decir, para que exista riesgo sísmico, debe existir la probabilidad de ocurrencia del sismo y la presencia de un edificio con un determinado grado de vulnerabilidad (Mena Hernández, 2002).

Marco normativo

La normativa se puede dividir en tres grandes grupos: normativa sismorresistente (a nivel nacional, europeo, y algunas americanas en las que se basa la metodología del rendimiento sísmico), normativa de fábricas de ladrillo (a nivel nacional y europeo) y la normativa de protección civil. A continuación se detallan las normas seleccionadas.

- Evolución de la normativa sismorresistente en España: MV-101 (Ministerio de la Vivienda, 1962), PGS-1 (Presidencia del Gobierno, 1969), Norma sismorresistente PDS-1 (Ministerio de Planificación del Desarrollo, 1974), Norma de Construcción Sismorresistente NCSE-94 (Ministerio de Obras Públicas Transportes y Medio Ambiente, 1994), Propuesta del anexo nacional español al Eurocódigo 8 (Dirección General del Instituto Geográfico Nacional, 1998).
- La vigente norma NCSE-02 (Ministerio de Fomento de España, 2002).
- Normativa de estructuras de hormigón armado: entre otras, Instrucción de Hormigón Estructural de 1973, EH-73 (Ministerio de la Presidencia, 1973), de 1991, EH-91 (Ministerio de la Presidencia, 1991), de 1998, EH-98 (Ministerio de Fomento de España, 1998), de 2008, EHE-08 (Ministerio de Fomento de España, 2008).
- Normativa de fábrica de ladrillo: MV 201/72 (Ministerio de la Presidencia, 1972), NBE (Ministerio de Obras Públicas Transportes y Medio Ambiente, 1990), FL-90 (Ministerio de Obras Públicas Transportes y Medio Ambiente, 1990), Código Técnico Documento Básico Seguridad Estructural Fábrica (CTE-DB-SE-F) (Ministerio de Fomento, 2019).
- Protección civil: Norma Básica de Protección Civil (Ministerio del Interior de España, 2007), Directriz Básica de Planificación de Protección Civil ante el Riesgo Sísmico (Ministerio de Justicia e Interior, 1995), Plan Estatal de Protección Civil ante el Riesgo Sísmico (Ministerio del Interior de España, 2010).
- Normativa europea. Eurocódigo 6: Proyecto de estructuras de fábrica (AENOR, 2013) y Eurocódigo 8: Proyecto de estructuras sismorresistentes (AENOR, 2010).
- Normativa Americana. ATC-40: Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings (Applied Technology Council [ATC], 1996) y FEMA 440: Improvement of nonlinear static seismic analysis procedures (Federal Emergency Management Agency [FEMA], 2005).

Los efectos de la interacción suelo-estructura

Las condiciones particulares del suelo pueden producir transformaciones importantes en la forma en la que se propaga un sismo, la cual puede llegar a producir efectos devastadores como consecuencia de un sismo magnitud moderada.

El suelo influye en la transmisión de las ondas sísmicas amplificándolas o atenuándolas debido a las condiciones geológicas y topográficas que presente. Además, puede producir una mayor duración de la señal sísmica y modificar su frecuencia. Esto se denomina «efecto local» y es de gran relevancia en un estudio de la peligrosidad sísmica. Ante un movimiento sísmico, las capas de suelo actúan como filtros de frecuencias, de manera que modifican la energía que transmiten a la estructura (Trigo, 2007).

En el caso de suelos blandos y poco compactos, estos amplifican el movimiento cuando las frecuencias predominantes son bajas (períodos altos), mientras que los suelos rígidos lo hacen con señales cuyas frecuencias predominantes son altas (períodos bajos).

Esta amplificación también se conoce como efecto de resonancia. Dicho efecto considera la diferencia entre la frecuencia de las ondas sísmicas y la frecuencia natural del suelo. Si la frecuencia de la onda sísmica es aproximadamente igual a la frecuencia natural del suelo, se produce la amplificación incrementándose la amplitud del movimiento del suelo significativamente. Esto ocurre en suelos como la arena suelta o la arcilla blanda.

En este tipo de suelos se produce también el fenómeno denominado interacción suelo-estructura, que consiste en que la flexibilidad del suelo influye en el movimiento de la estructura y la estructura influye en el movimiento del suelo. Esta interacción puede ser importante en estructuras rígidas y de gran masa.

Otros efectos con origen en las características geológicas del suelo son los denominados efectos inducidos, los cuales pueden provocar daños en las estructuras incluso mayores que los del propio sismo. Entre estos fenómenos se encuentran la licuefacción del suelo, la inestabilidad de taludes y de suelos blandos o poco densos, el incremento en los empujes de tierra en muros, los asentamientos locales o la subsidencia (Carrillo, 2008).

El caso de estudio

Andalucía se encuentra al sur de la península ibérica y se caracteriza por ser una de las zonas de mayor peligrosidad sísmica de la misma (Ministerio de Fomento de España, 2012), debido a la cercanía a la convergencia entre placas tectónicas (Amaro-Mellado, Morales-Esteban, y Martínez-Álvarez, 2017). Pese a tener una peligrosidad moderada, Andalucía se ha visto afectada por terremotos de magnitud alta y con períodos de retorno largo (Amaro-Mellado, Morales-Esteban, Asencio-Cortés y Martínez-Álvarez, 2017). Pese a la peligrosidad de la zona, existe una falta de estudios sobre riesgo sísmico (peligrosidad, vulnerabilidad y coste) en la comunidad. Además, en este caso, los edificios seleccionados como casos de estudio están situados en el valle del Guadalquivir, sobre suelos que están caracterizados por la existencia de una serie de estratos de distinta resistencia. Los estratos más superficiales tienen una resistencia de muy floja a media (relleno, arcilla y arena limosa) y los más profundos son más duros (zahorras y marga azul del Guadalquivir), lo que puede amplificar el efecto del terremoto.

Las consecuencias del reciente terremoto de Lorca pusieron de manifiesto la alta vulnerabilidad sísmica de los edificios existentes. Durante este evento, varios edificios, especialmente los de muros de carga sin reforzar, fueron dañados o colapsaron, dando lugar a importantes pérdidas sociales y económicas (Sorrentino *et al.*, 2019). Según (Ávila-Haro *et al.*, 2022), estos edificios son los más vulnerables frente a posibles eventos sísmicos. En el caso de Andalucía,

muchas de las barriadas de antigua construcción se construyeron siguiendo este sistema estructural y durante el período 1960-1970, mucho antes de la aplicación de normativas sísmicas y constructivas.

En general, los edificios objeto de estudio presentan una serie de características que hacen que tengan una elevada vulnerabilidad sísmica: ausencia de diseño sísmico (fueron construidos antes de la aplicación de normativas sísmicas); altura (estas barriadas se componen de edificios de un mínimo de cuatro pisos, llegando a alcanzarse más de 10 plantas lo que los hace más propensos a sufrir daños durante los terremotos); poco mantenimiento; degradación de los materiales por los efectos del envejecimiento; baja calidad de los materiales; e irregularidades en planta y altura. Estos edificios comparten características constructivas y estructurales similares a las observadas en los edificios dañados tras el terremoto de Lorca. Esta vulnerabilidad, sumado a que Andalucía se caracteriza por una peligrosidad sísmica considerable, hace que el riesgo sísmico de estos edificios sea importante.

2.4. LA REHABILITACIÓN COMO ESTRATEGIA SOSTENIBLE

Dada la situación anteriormente presentada, mejorar tanto el rendimiento energético como sísmico se ha convertido en una preocupación importante en la UE. Los esfuerzos se centran en reducir el impacto ambiental, el consumo energético y el riesgo sísmico al mismo tiempo en el que se aumenta el nivel de vida y la seguridad de la población. La mejora se puede lograr reemplazando o demoliendo las estructuras más expuestas. Sin embargo, esto no se considera una estrategia adecuada por el alto impacto económico y ambiental. Las nuevas construcciones tienen costes asociados más altos y solo en la UE, los residuos de construcción y demolición representan aproximadamente el 33% de la cantidad total de residuos (European Commission, 2012). Además, las estrategias basadas en demoler y reponer son aún peores si se practican de forma extensiva. Por lo tanto, las políticas de la UE están impulsando la rehabilitación de edificios para mejorar su rendimiento, lo que se traduce en acciones más sostenibles y beneficiosas (European Parliament, 2016).

En este sentido, como parte de las acciones clave del pacto europeo *Green Deal*, es necesario un aumento de la tasa de rehabilitación de edificios para garantizar que los objetivos de ahorro de energía y descarbonización de la UE se alcanzan para 2030-2050 correctamente (Pohoryles *et al.*, 2020). Además, se han realizado esfuerzos recientes para garantizar la seguridad sísmica de las estructuras en áreas propensas a terremotos de la UE mediante la evaluación de la vulnerabilidad sísmica (Cardinali *et al.*, 2021) y la rehabilitación de los edificios existentes (Requena-Garcia-Cruz *et al.*, 2021). No obstante, la tasa de rehabilitación de edificios sigue siendo muy baja en la UE, alcanzando el 2-3% (European Parliament, 2016). Esto se debe principalmente a la insuficiente concienciación sobre los peligros y la investigación sobre el rendimiento de los edificios y los beneficios (en términos de impacto económico y medioambiental) de la rehabilitación.

Si bien la acción central del proceso de rehabilitación parece ser el rendimiento energético, no debe omitirse la interacción con otros aspectos relacionados con el funcionamiento del edificio como sistema (European Commission, 2019). De hecho, en la etapa de diseño de la rehabilitación,

la combinación de información energética, estructural y ambiental puede conducir a intervenciones más eficientes y la posibilidad de beneficios económicos y ambientales adicionales (llegando a ahorros del orden de miles de millones por año) (Belleri y Marini, 2016; Filippova *et al.*, 2018). En este contexto, existe una tendencia en la UE a desarrollar prácticas sostenibles para la renovación de edificios existentes con el objetivo de aumentar el nivel de eficiencia energética y reducir la vulnerabilidad sísmica a través de acciones combinadas (European Parliament, 2016; Romano *et al.*, 2014).

Al realizar una rehabilitación combinada del comportamiento energético y sísmico es posible desarrollar prácticas sostenibles que podrían resultar en una reducción de (Caprino *et al.*, 2021): i) el impacto ambiental, expresado en términos de consumo de energía o emisiones de carbono del uso de los edificios; ii) el impacto económico, relacionado con los costes de construcción y mantenimiento, así como las pérdidas anuales esperadas por la demanda energética y sísmica; y, iii) el riesgo social, referido al nivel y confort de vida, la conciencia del riesgo y la pobreza energética o las potenciales pérdidas sociales por eventos sísmicos. Sin embargo, muchos estudios que se ocupan de la rehabilitación a gran escala se han centrado profundamente en aspectos únicos, como la mejora mecánica, mientras que pocos trabajos se han ocupado de la integración de los objetivos sostenibles basados en los aspectos ambientales, económicos y sociales (Romano *et al.*, 2014).

Dada la situación actual, la problemática que se aborda en el proyecto RENERISIS es común a muchos países y existe un reciente interés por la mejora conjunta del comportamiento energético y la seguridad sísmica de edificios existentes. En este contexto, el concepto en el que se basa el proyecto RENERISIS desde su origen es la sostenibilidad ya que se apuesta por: la rehabilitación en lugar de por la obra nueva, la revalorización de los recursos existentes, el diseño eco-eficiente de las soluciones y la mejora de la eficiencia energética de los edificios.

2.5. REFERENCIAS

- AENOR (2010): *Eurocódigo 8: Proyecto de estructuras sismorresistentes*. España. <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma/?c=N0060451>
- AENOR (2013): *Eurocódigo 6: Proyecto de estructuras de fábrica*. España. <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma/?c=N0052159>
- Agencia Andaluza de la Energía (2020): *Datos energéticos de Andalucía*. España. <https://www.agenciaandaluzadelaenergia.es/es>
- Amaro-Mellado, J. L., Morales-Esteban, A., Asencio-Cortés, G. y Martínez-Álvarez, F. (2017): «Comparing seismic parameters for different source zone models in the Iberian Peninsula», *Tectonophysics*, 717 (August), 449-472. <https://doi.org/10.1016/J.TECTO.2017.08.032>
- Amaro-Mellado, J. L., Morales-Esteban, A. y Martínez-Álvarez, F. (2017): «Mapping of seismic parameters of the Iberian Peninsula by means of a geographic information system», *Central European Journal of Operations Research*. <https://doi.org/10.1007/s10100-017-0506-7>
- Applied Technology Council (ATC) (1996): *ATC-40: seismic evaluation and retrofit of concrete buildings*. Estados Unidos. http://digitalcommons.calpoly.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1052&context=cenv_fac
- Avila-Haro, J. A., Gonzalez-Drigo, R., Vargas-Alzate, Y. F., Pujades, L. y Barbat, A. (2022): «Probabilistic seismic assessment of a high-rise URM building», *Journal of Building Engineering*, 45, 103344. <https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2021.103344>

- Barbat, A. H., Caicedo, C., Canas, J. A. y Aguiar, R. (1994): «Vulnerabilidad sísmica de edificios», en A. H. Barbat (ed.), *Monografías de Ingeniería Sísmica. CIMNE-IS-6*. Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería. Barcelona, España.
- Barbat, A. H. y Pujades, L. G. (2004): «Evaluación de la Vulnerabilidad y del riesgo sísmico en zonas urbanas. Aplicación a Barcelona». In U. do Minhó (ed.), *6º Congresso Nacional de Sismologia e Engenharia Sísmica* (pp. 229-252). Portugal.
- Belleri, A. y Marini, A. (2016): «Does seismic risk affect the environmental impact of existing buildings?», *Energy and Buildings*, 110, 149-158. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.10.048>
- Benito, B. y Jiménez, M. E. (1999): «Peligrosidad sísmica», *Física de La Tierra*, 11, 13-47. <https://revistas.ucm.es/index.php/FITE/article/download/FITE9999110013A/12067>
- Bournas, D. A. (2018): «Concurrent seismic and energy retrofitting of RC and masonry building envelopes using inorganic textile-based composites combined with insulation materials: A new concept», *Composites Part B: Engineering*, 148, 166-179. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.04.002>
- Caprino, A., Lorenzoni, F., Carneletto, L., Feletto, L., de Carli, M. y Da Porto, F. (2021): «Integrated Seismic and Energy Retrofit Interventions on a URM Masonry Building: The Case Study of the Former Courthouse in Fabriano», *Sustainability*, 13(17), 9592. <https://doi.org/10.3390/SU13179592>
- Cardinali, V., Cristofaro, M. T., Ferrini, M., Nudo, R., Paoletti, B. y Tanganelli, M. (2021): «A Multiscale Approach for the Seismic Vulnerability Assessment of Historical Centres in Masonry Building Aggregates: Cognitive Approach and Interdisciplinary Perspectives», *International Journal of Architectural Heritage*, 1-26. <https://doi.org/10.1080/15583058.2021.1992536>
- Carre, E. y Zornoza, V. (2011): «Terremotos en la Península Ibérica», *Enseñanzas de Las Ciencias de La Tierra*, 19.3, 289-295.
- Carrillo, P. (2008): *Influencia del suelo en la respuesta sísmica de estructuras. Seminario Técnico «Dr. Eduardo Arnal»*, SIDETUR. http://www.construccionenacero.com/sites/construccionenacero.com/files/u11/ci_29_influencia_del_suelo_en_la_respuesta_sismica.pdf
- Dirección General del Instituto Geográfico Nacional (1998): *Propuesta del anexo nacional español a la norma europea en 1998 (Eurocódigo 8) estructuras resistentes al sismo*. España. <https://www.fomento.gob.es/NR/rdonlyres/DE08DF70-CACE-4C60-9333-D4C96C75C878/142562/ANUNEEN19986partes1.pdf>
- Domínguez, S., Sendra, J. J., León, A. L. y Esquivias, P. M. (2012): «Towards Energy Demand Reduction in Social Housing Buildings: Envelope System Optimization Strategies», *Energies*, 5(7), 2263-2287. <https://doi.org/10.3390/en5072263>
- EU Building Stock Observatory (2015): *Energy efficiency trends in buildings*. Unión Europea. <http://www.zebra-monitoring.enerdata.eu/>
- European Commission (2012): *Energy-efficient buildings PPP beyond2013 – Research and Innovation Roadmap. Document for E2B European Initiative (ECTP)*. Unión Europea. http://ectp.ectp.org/cws/params/ectp/download_files/36D2263v1_E2B_Roadmap_Infodays_V.pdf
- European Commission (2019): *Energy efficiency first: accelerating towards a 2030 objective of 32.5%*. Unión Europea. https://ec.europa.eu/info/news/energy-efficiency-first-accelerating-towards-2030-objective-2019-sep-25_en
- European Parliament (2016): *Boosting building renovation: what potential and value for Europe?* Unión Europea. [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2016/587326/IPOL_STU\(2016\)587326_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2016/587326/IPOL_STU(2016)587326_EN.pdf)
- European Parliament (2019): *The European Green Deal*. Unión Europea. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?qid=1576150542719&uri=COM%3A2019%3A640%3AFIN>
- Federal Emergency Management Agency (FEMA) (2005): *FEMA-440: Improvement of nonlinear static seismic analysis procedures* (vol. 440, Issue June). Estados Unidos. <https://mitigation.eeri.org/wp-content/uploads/fema-440.pdf>
- Filippova, O., Xiao, Y., Rehm, M. y Ingham, J. (2018): «Economic effects of regulating the seismic strengthening of older buildings», *Building Research & Information*, 46(7), 711-724. <https://doi.org/10.1080/09613218.2017.1357318>

- Freddi, F., Galasso, C., Cremen, G., Dall'Asta, A., di Sarno, L., Giaralis, A., Gutiérrez-Urzúa, F., Málaga-Chuquitaype, C., Mitoulis, S. A., Petrone, C., Sextos, A., Sousa, L., Tarbali, K., Tubaldi, E., Wardman, J. y Woo, G. (2021): «Innovations in earthquake risk reduction for resilience: Recent advances and challenges», *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 60, 102267. <https://doi.org/10.1016/J.IJDRR.2021.102267>
- Ibáñez Iralde, N. S., Pascual, J. y Salom, J. (2021): «Energy retrofit of residential building clusters. A literature review of crossover recommended measures, policies instruments and allocated funds in Spain», *Energy and Buildings*, 252, 111409. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111409>
- Indirli, M., S. Kouris, L. A., Formisano, A., Borg, R. P. y Mazzolani, F. M. (2013): «Seismic Damage Assessment of Unreinforced Masonry Structures After The Abruzzo 2009 Earthquake: The Case Study of the Historical Centers of L'Aquila and Castelvechio Subequo», *International Journal of Architectural Heritage*, 7(5), 536578. <https://doi.org/10.1080/15583058.2011.654050>
- Institut Geologic de Catalunya (2011): *El terremoto de Lorca del 11 de mayo de 2011: informe de la inspección y de los trabajos de campo realizados*. España. <http://upcommons.upc.edu/handle/2117/21175>
- Instituto Geográfico Nacional (n.d.): *Mapas de sismicidad y peligrosidad*. España. Recuperado 19 de junio de 2017, a partir de <http://www.ign.es/web/ign/portal/mapas-sismicidad>
- Instituto Nacional de Estadística (2008): *Consumo y producción sostenible*. España. https://www.ine.es/ss/Satellite?blobcol=urldata&blobheader=application%2Fpdf&blobheadername1=Content-Disposition&blobheadervalue1=attachment%3B+filename%3Ddesos08_cap2.pdf&blobkey=urldata&blobtable=MungoBlobs&blobwhere=453%2F543%2Fdesos08_cap2.pdf&ssbinary=true
- Instituto Nacional de Estadística (2022): *Web del INE*. España. <https://www.ine.es/>
- Instituto para la diversificación y ahorro de la energía (IDAE) (2011): *Proyecto SECH-SPAHOUSEC. Análisis del consumo energético del sector residencial en España. Informe Final*. España. <https://docplayer.es/24336-Analisis-del-consumo-energetico-del-sector-residencial-en-espana.html>
- Instituto para la diversificación y ahorro de la energía (IDAE) (2020): *Estado de la certificación energética de los edificios. 9º Informe*. España. https://energia.gob.es/desarrollo/EficienciaEnergetica/CertificacionEnergetica/Documentos/Documentos%20informativos/2021_Informe_seguimiento_9_CERTIFICACION_ENERGETICA.pdf
- Junta de Andalucía (2016): *Decreto 141/2016, de 2 de agosto, por el que se regula el Plan de Vivienda y Rehabilitación de Andalucía 2016-2020*. España. <https://www.juntadeandalucia.es/boja/2016/151/2>
- Martínez-Álvarez, F., Gutiérrez-Avilés, D., Morales-Esteban, A., Reyes, J., Amaro-Mellado, J. L. y Rubio-Escudero, C. (2015): «A novel method for seismogenic zoning based on triclustering: Application to the Iberian Peninsula», *Entropy*, 17(7), 5000-5021. <https://doi.org/10.3390/e17075000>
- Mena Hernández, U. (2002): *Evaluación del riesgo sísmico en zonas urbanas*. Tesis doctoral. Universitat Politècnica de Catalunya.
- Menna, C., del Vecchio, C., di Ludovico, M., Mauro, G. M., Ascione, F. y Prota, A. (2021): «Conceptual design of integrated seismic and energy retrofit interventions», *Journal of Building Engineering*, 38, 102190. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102190>
- Menna, C., Felicioni, L., Negro, P., Lupísek, A., Romano, E., Prota, A. y Hájek, P. (2022): «Review of methods for the combined assessment of seismic resilience and energy efficiency towards sustainable retrofitting of existing European buildings», *Sustainable Cities and Society*, 77, 103556. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103556>
- Ministerio de Fomento (2006): *Código Técnico de la Edificación (CTE)*. España. <https://www.codigotecnico.org/>
- Ministerio de Fomento (2019): *Documento Básico SE-F: Seguridad estructural: Fábrica*. España. <https://www.codigotecnico.org/pdf/Documentos/SE/DBSE-F.pdf>
- Ministerio de Fomento de España (1998): *Instrucción de Hormigón Estructural (EHE-98)*. España. <https://www.boe.es/eli/es/rd/1998/12/11/2661>
- Ministerio de Fomento de España (2002): *Norma de Construcción Sismorresistente de Edificación*. España. https://www.mitma.gob.es/recursos_mfom/0820200.pdf
- Ministerio de Fomento de España (2008): *EHE-08: Instrucción de Hormigón Estructural*. España. https://www.mitma.gob.es/recursos_mfom/1820100.pdf

- Ministerio de Fomento de España (2012): *Actualización de mapas de peligrosidad sísmica de España*. España. <https://www.ign.es/resources/acercaDe/libDigPub/ActualizacionMapasPeligrosidadSismica2012.pdf>
- Ministerio de Justicia e Interior (1995): *Directriz Básica de Planificación de Protección Civil ante el Riesgo Sísmico*. España. <https://www.boe.es/eli/es/res/1995/05/05/1>
- Ministerio de la Presidencia (1972): *Norma MV 201/72. Muros Resistentes de Fábrica de Ladrillo*. España. <https://www.boe.es/boe/dias/1972/05/31/pdfs/A09594-09624.pdf>
- Ministerio de la Presidencia (1973): *Instrucción EH-73*. España. <https://www.boe.es/boe/dias/1973/12/07/pdfs/R23701-24204.pdf>
- Ministerio de la Presidencia (1991): *Instrucción EH-91*. España. <https://www.boe.es/eli/es/rd/1991/06/28/1039>
- Ministerio de la Presidencia (2013): *Real Decreto 235/2013, de 5 de abril, por el que se aprueba el procedimiento básico para la certificación de la eficiencia energética de los edificios*. España. <https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2013-3904>
- Ministerio de la Vivienda (1962): *Norma MV 101.1962*. España. <https://www.boe.es/boe/dias/1963/02/09/pdfs/A02207-02225.pdf>
- Ministerio de la Vivienda (2008): *Zonificación Climática de Andalucía por Municipios para su uso en el CTE Ahorro de Energía. Limitación de la Demanda CTE HE 1*. España. <https://www.juntadeandalucia.es/export/drupaljda/guia%20diseno%20integral%20vivienda%20energ%20eficientes.pdf>
- Ministerio de Obras Públicas Transportes y Medio Ambiente (1990): *Norma básica de la edificación NBE FL-90: Muros resistentes de fábrica de ladrillo*. España. <https://www.boe.es/eli/es/rd/1990/12/20/1723>
- Ministerio de Obras Públicas Transportes y Medio Ambiente (1994): *Norma de Construcción Sismorresistente: Parte General y Edificación (NCSE-94)*. España. <https://www.boe.es/eli/es/rd/1994/12/29/2543>
- Ministerio de Planificación del Desarrollo (1974): *Norma sismorresistente PDS-1. Parte A*. España. <https://www.boe.es/boe/dias/1974/11/21/pdfs/A23585-23601.pdf>
- Ministerio del Interior de España (2007): *Norma Básica de Protección Civil Real decreto 407/1992, de 24 de Abril*. España. <https://www.boe.es/eli/es/rd/1992/04/24/407>
- Ministerio del Interior de España (2010): *Plan Estatal de Protección Civil ante el Riesgo Sísmico*. España. <https://www.proteccioncivil.es/documents/20121/86319/Plan-Estatal-de-Proteccion-Civil-ante-el-Riesgo-Sismico.pdf/f13c3076-770a-1765-36e7-a8d905601cb1?t=1611914048123&download=true>
- Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (2021): *Real Decreto 691/2021, de 3 de agosto, por el que se regulan las subvenciones a otorgar a actuaciones de rehabilitación energética en edificios existentes, en ejecución del Programa de rehabilitación energética para edificios existentes en municipios de reto demográfico (Programa PREE 5000)*. España. <https://www.boe.es/eli/es/rd/2021/08/03/691>
- Miyamoto (2009): *L'Aquila, Italy M6.3 Earthquake April 6 2009. Earthquake field investigation report*. Unión Europea. https://www.globalriskconsultants.com/_FR/pdf/NatHaz/April_2009/April_2009-M6.3_LAquila_Italy_Earthquake_Journal_Entry_3.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 and Geosciences*, 73. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2014.09.003>
- Oliveira, C. S. (2003): «Seismic vulnerability of historical constructions: A contribution», *Bulletin of Earthquake Engineering*, 1(1), 37-82. <https://doi.org/10.1023/A:1024805410454>
- Pohoryles, D. A., Maduta, C., Bournas, D. A. y Kouris, L. A. (2020): «Energy performance of existing residential buildings in Europe: A novel approach combining energy with seismic retrofitting», *Energy and Buildings*, 223, 110024. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110024>
- Presidencia del Gobierno (1969): *Norma sismorresistente PGS-1. Parte A*. España. https://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-1969-148
- Requena-García-Cruz, M. V., Morales-Esteban, A. y Durand-Neyra, P. (2021): «Optimal ductility enhancement of RC framed buildings considering different non-invasive retrofitting techniques», *Engineering Structures*, 242, 112572. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112572>

- Romano, E., Negro, P. y Taucer, F. (2014): *Seismic performance assessment addressing sustainability and energy efficiency*. https://www.researchgate.net/profile/Paolo-Negro-2/publication/259828039_Seismic_performance_assessment_addressing_sustainability_and_energy_efficiency/links/0c96052e0daf1e09fe000000/Seismic-performance-assessment-addressing-sustainability-and-energy-efficiency.pdf
- Ruiz-Pinilla, J. G., Adam, J. M., Pérez-Cárcel, R., Yuste, J. y Moragues, J. J. (2016): «Learning from RC building structures damaged by the earthquake in Lorca, Spain, in 2011», *Engineering Failure Analysis*, 68, 76-86. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2016.05.013>
- Sorrentino, L., Cattari, S., da Porto, F., Magenes, G. y Penna, A. (2019): «Seismic behaviour of ordinary masonry buildings during the 2016 central Italy earthquakes», *Bulletin of Earthquake Engineering*, 27(10), 5583-5607. <https://doi.org/10.1007/s10518-018-0370-4>
- Trigo Salas, T. A. (2007): «Influencia de la amplificación local de las ondas sísmicas y la interacción suelo-fundación en el puente Marga-Marga». Universidad de Chile.
- United Nations (2015): *Sendai framework for disaster risk reduction 2025-2030*. United Nations. International strategy for disaster reduction. <https://www.undrr.org/publication/sendai-framework-disaster-risk-reduction-2015-2030>

3

Medidas para la mejora de la eficiencia energética y la seguridad sísmica en los edificios existentes

M. Pilar López-Piña*, María-Victoria Requena-García-Cruz*
y Emilio Romero-Sánchez*

* *Departamento de Estructuras de Edificación e Ingeniería del Terreno
Universidad de Sevilla*

RESUMEN

A día de hoy, gran parte del parque edificatorio europeo necesita ser rehabilitado energéticamente y sísmicamente para cumplir los objetivos mínimos de la normativa, así como para lograr los objetivos de reducción del consumo energético marcados por la Unión Europea.

En este capítulo, se expone una visión global sobre las diferentes medidas, tanto de refuerzo sísmico como de mejora del comportamiento energético de edificios existentes. Se incluyen las medidas más difundidas, así como otras de reciente publicación, cuyos beneficios en la rehabilitación de edificios han sido ampliamente demostrados.

En el caso de la mejora del comportamiento energético, se elabora una clasificación en función del aspecto a mejorar: demanda energética o la eficiencia de las instalaciones. En el caso de las medidas para la mejora del comportamiento sísmico, estas han sido clasificadas según la tipología estructural edificatoria: estructura de hormigón armado, de muros de carga (principalmente de fábrica) y metálica.

3.1. INTRODUCCIÓN

A día de hoy, gran parte del parque edificatorio europeo necesita ser rehabilitado energéticamente y sísmicamente para cumplir los requisitos mínimos de la normativa, así como para lograr los objetivos de reducción de consumo energético marcados por la Unión Europea. Además, cuestiones como el precio de la energía o las consecuencias catastróficas de diversos terremotos ocurridos recientemente en Europa, han aumentado el interés por llevar a cabo estas mejoras.

En los últimos años se ha desarrollado una intensa labor investigadora sobre las diferentes estrategias a adoptar, así como sobre sus beneficios y limitaciones (Ibáñez Iralde *et al.*, 2021). Por otro lado, la industria ha desarrollado nuevos sistemas y soluciones técnicas para poder responder a las diversas necesidades que se plantean.

En este capítulo se expondrá una visión global sobre las diferentes medidas, tanto de refuerzo sísmico como de reducción del consumo energético, que se pueden llevar a cabo en edificios existentes para alcanzar estos objetivos.

3.2. MEDIDAS DE LA MEJORA DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA

3.2.1. Tipos y clasificación de las medidas

Félix Guattari en su obra *Las tres ecologías* (Guattari, 2000) estableció lo que se define como las tres dimensiones ecológicas básicas: la ambiental, la social y la mental. Posteriormente, esto ha dado lugar a las dimensiones fundamentales de la sostenibilidad: la dimensión ambiental, la económica y la social. Más tarde se le incorporó la dimensión cultural (Young, 1997). La eficiencia energética está relacionada tanto con la dimensión ambiental y la dimensión económica de la sostenibilidad.

Según la Directiva Europea 2002/91, relativa a la eficiencia energética de la edificación, este concepto se define de la siguiente manera:

Eficiencia energética de un edificio: la cantidad de energía consumida realmente o que se estime necesaria para satisfacer las distintas necesidades asociadas a un uso estándar del edificio, que podrá incluir, entre otras cosas, la calefacción, el calentamiento del agua, la refrigeración, la ventilación y la iluminación.

(Parlamento Europeo, 2002)

Por tanto, para cuantificar la eficiencia energética, se suele emplear como magnitud el consumo de energía final que requieren los edificios. Este se expresa de la siguiente manera:

$$C = D / \eta \quad \text{Eq. 3.1}$$

siendo C, el consumo energético; D, la demanda energética, y η , el rendimiento de las instalaciones. Esta expresión nos permite deducir las dos únicas opciones para reducir el consumo de energía de los edificios: disminuir la demanda energética o aumentar el rendimiento de las instalaciones y equipos.

Una clasificación de las medidas de eficiencia energética muy empleada es aquella que las divide en dos grandes grupos, atendiendo al objetivo que se persiga en cada caso para reducir el consumo. Es decir, un grupo corresponde a las estrategias enfocadas a la reducción de la

demanda de energía, generalmente actuaciones pasivas en la envolvente de los edificios, y otra a las orientadas a incrementar el rendimiento de los equipos de acondicionamiento térmico, higrotérmico, lumínico y de producción de agua caliente.

Este capítulo se centrará fundamentalmente en las medidas para la reducción de la demanda energética, ya que este tipo de estrategias son las que se aplicarán en el caso de estudio objeto de este libro.

El Código Técnico de la Edificación (Ministerio de Transportes Movilidad y Agenda Urbana, 2022) establece una serie de condiciones en la envolvente térmica de los edificios para el control de la demanda energética. Están relacionadas con su transmitancia térmica, su control solar y su permeabilidad al aire. Las estrategias de mejora que se pueden implementar para lograr estos objetivos en edificios existentes atienden a las siguientes categorías: adición de aislamiento térmico en las zonas opacas de la envolvente, protecciones solares en los huecos y mejora de la calidad de las soluciones de huecos.

Varias son las guías técnicas en España que recogen estrategias para la rehabilitación energética de los edificios residenciales. En Ibáñez Iralde *et al.* (2021) se realizó una revisión de todas ellas y se observó que la mayoría de las medidas que proponen para la reducción de la demanda energética están relacionadas con las tres categorías antes indicadas.

Sin embargo, existen otras estrategias menos difundidas como el incremento de inercia térmica, los sistemas de captación solar o los sistemas de enfriamiento, que presentan resultados bastante interesantes. Tienen su origen en las estrategias de diseño de la arquitectura bioclimática pero posteriormente se ha demostrado su utilidad en actuaciones de rehabilitación.

A partir de lo anteriormente expuesto, se propone una clasificación de las medidas de reducción de la demanda energética en la que se incluyen los sistemas más extendidos junto las estrategias bioclimáticas que se acaban de mencionar. Con ella no se pretende recoger de forma exhaustiva todas las mejoras, sino únicamente ofrecer una visión global sobre este tema de forma ordenada (tabla 3.1, página siguiente).

3.2.2. Medidas para la reducción de la demanda energética

Incorporación de aislamiento térmico

La incorporación de aislamiento térmico en la envolvente es posiblemente la estrategia de mejora de las condiciones térmicas más difundida. También la que ha sido objeto de un mayor número de investigaciones en los últimos años (Ibáñez Iralde *et al.*, 2021). Las posibilidades y variantes que ofrece son muy amplias. Así pues, según su comportamiento, se pueden distinguir cuatro tipos de aislamientos: aislamientos conductivos, aislamientos convectivos, aislamientos radiantes y aislamientos orgánicos (Neila González, 2004).

Aislamiento conductivo

El aislamiento conductivo es el más habitual de todos. Los materiales que emplea se caracterizan por tener muy baja conductividad térmica. Su presencia en la envolvente térmica de los

Tabla 3.1. Clasificación de las medidas de mejora de la eficiencia energética. Elaboración propia

Medidas de mejora de la eficiencia energética en edificios existentes			
Medidas de reducción de la Demanda	Incorporación de aislamiento térmico	Tipo de aislamiento	Conductivo
			Convectivo
			Radiante
			Orgánico
		Ubicación	Zonas opacas continuas
			Puentes térmicos
	Mejora de la calidad de los huecos	Marcos	
		Vidrios	
	Protección solar	Opacos	
		Huecos	
	Incremento de inercia térmica	Con materiales de cambio de fase	
	Sistemas de captación solar	Muros Trombe	
Invernaderos adosados, galerías acristaladas			
Sistemas de ventilación natural y enfriamiento	Estrategias para eliminar el sobrecalentamiento		
	Estrategias de enfriamiento		
Medidas de mejora de la eficiencia de las instalaciones	Climatización		
	Ventilación		
	ACS		
	Iluminación		

edificios supone una reducción drástica de las transferencias de calor. Por ello, su empleo se encuentra muy extendido en las actuaciones de mejora energética.

En los cerramientos existentes con bajas prestaciones térmicas puede disponerse tanto por el interior como por el exterior. Además, en el caso de que presenten cámara de aire continua, puede incorporarse mediante relleno o inyección en el interior de esta.

El aislamiento por el exterior permite minimizar el efecto de gran parte de los puentes térmicos y no implica la reducción del espacio útil que conlleva el aislamiento interior. Además, supone una mayor estabilidad térmica de los locales y previene la formación de condensaciones intersticiales (Instituto para la diversificación y ahorro de la energía [IDAE], 2012). Aunque no siempre es posible su aplicación, como sucede en el caso de las fachadas con valores patrimoniales que puedan verse afectados por este tipo de actuación.

La incorporación de aislamiento en las cubiertas se puede realizar de diferentes formas. En el caso de las cubiertas planas se puede disponer por el exterior (figura 3.1), sobre la impermeabilización, configurándose de esta manera una cubierta invertida. En este caso, el material aislante deberá ser estable a la radiación y a la humedad. Cuando se trate de cubiertas inclinadas se puede optar por disponer el aislamiento en la parte inferior, bien en paneles, mantas o proyectado, dependiendo de las características del espacio bajo ella. También existen en el mercado diversos

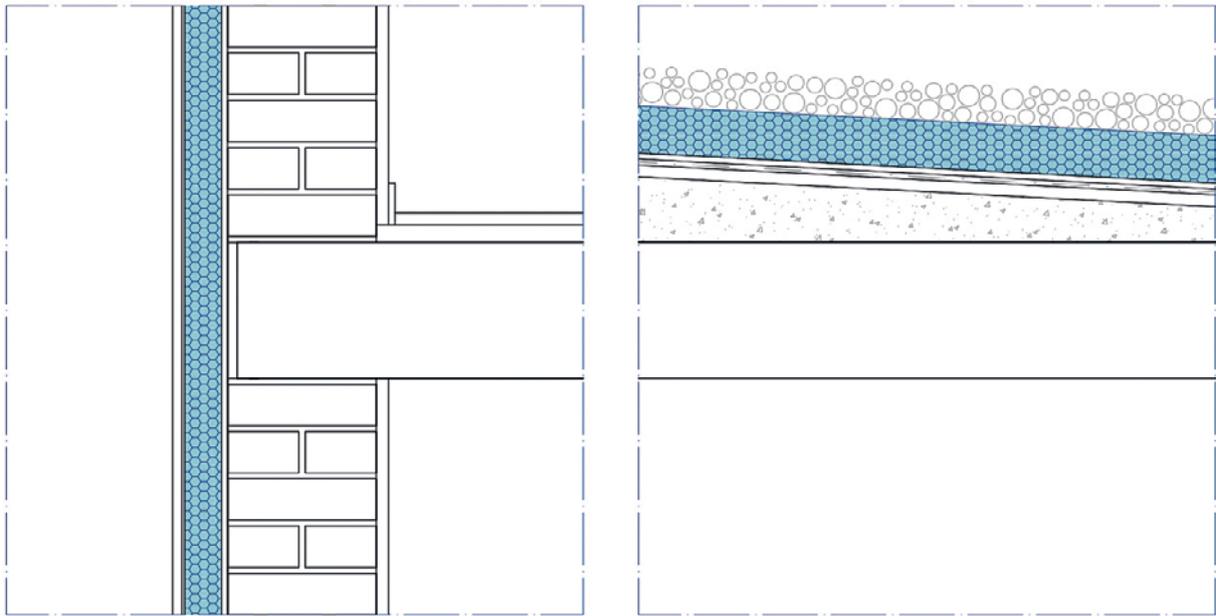


Figura 3.1. Incorporación de aislamiento por el exterior del cerramiento existente (izquierda) e incorporación de aislamiento en cubierta plana (derecha). Elaboración propia

sistemas y soluciones técnicas para la incorporación de aislamiento por el exterior de las cubiertas inclinadas, con la cubrición que proceda en cada caso (Neila González, 2004).

Los materiales más empleados como aislamiento son el poliestireno expandido (EPS), el poliestireno extruido (XPS), la lana mineral (MW) y el poliuretano (PUR). Sin embargo, existen muchos otros como la lana de vidrio, la celulosa, el corcho o la lana de oveja. Incluso morteros con propiedades aislantes fabricados con aditivos a base de fibras de poliuretanos o lanas minerales que les confieren una baja conductividad. Los estudios más recientes sobre los diferentes materiales aislantes no solo tienen en cuenta sus propiedades térmicas, sino también otros aspectos como los impactos ambientales asociados a su fabricación, transporte o final de su vida útil. Con el fin de que estas cuestiones sean también tenidas en cuenta por parte del proyectista en la elección del material (Carabaño Rodríguez, 2015).

Finalmente, cabe indicar que cuando se logra una reducción significativa de los valores de transmitancia térmica de las zonas continuas de la envolvente, los efectos de los puentes térmicos adquieren mayor relevancia. Por ello, en las actuaciones de rehabilitación debe contemplarse la posibilidad de incorporar aislamiento en estos puntos.

Aislamiento convectivo

El aislamiento convectivo es el que proporcionan las cámaras de aire ventiladas. La ventilación permite disipar el calor absorbido por la cara exterior de estas, de forma que se evita el sobrecalentamiento (Neila González, 2004). Su empleo está recomendado para zonas donde la carga solar sea elevada y siempre en combinación con material aislante, ya que por sí sola su mejora térmica es insuficiente.

Este sistema se puede emplear tanto en fachadas como en cubiertas. Las fachadas ventiladas basan su funcionamiento en el efecto chimenea que se produce en la cámara, inducido por la

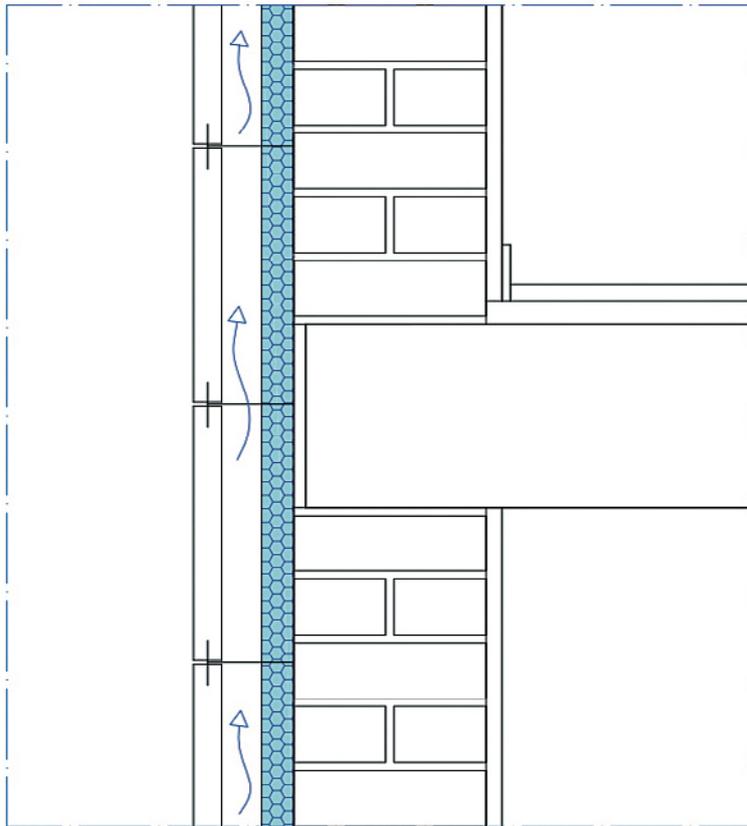


Figura 3.2. Fachada ventilada de juntas abiertas. Elaboración propia

radiación solar. Uno de los sistemas más extendidos es el de juntas abiertas (figura 3.2), en el que la cámara ventila por las separaciones o juntas que se crean entre las diferentes piezas que conforman la nueva hoja externa de la fachada. Este sistema también permite eliminar gran parte de los puentes térmicos que puedan existir en fachada y previene la aparición de condensaciones intersticiales (Emanuela Giancola, 2010).

El sistema de cubierta ventilada presenta un funcionamiento análogo al de las fachadas. Se puede implementar tanto en el caso de cubiertas planas como inclinadas. En el mercado existen diferentes soluciones concebidas para la rehabilitación de estas. No obstante, estas actuaciones requieren el desmontaje de parte de la cubierta existente y suponen, generalmente, una intervención de mayor envergadura que en el caso de las fachadas.

Aislamiento radiante

El aislamiento radiante se basa en el empleo de los denominados materiales termorreflectantes. Estos poseen un acabado con una serie de propiedades ópticas que refleja la energía radiante que reciben. Por ello, deben situarse siempre en contacto con el aire, donde se pueden producir las reflexiones de las ondas térmicas (Neila González, 2004). Permite la incorporación de aislamiento en espacios con dimensiones muy reducidas. No obstante, el empleo de esta solución presenta bastantes limitaciones y no se suele incluir en las actuaciones de rehabilitación, aunque sin duda es una opción para tener en cuenta en el caso de situaciones donde no sea posible otro tipo de aislamiento.

Aislamiento orgánico

Es el sistema que emplea como elemento aislante la vegetación. Se trata de una medida que además de proporcionar aislamiento en las diferentes superficies, las protege de la radiación solar, por tanto, ofrece importantes beneficios en época estival. Su uso más extendido es el de la cubierta ecológica. Consiste en un tipo de cubierta invertida que cuenta con un substrato de poco espesor y una capa vegetal con plantas de bajo porte (Machado *et al.*, 2000). Este sistema genera un enfriamiento de los espacios bajo cubierta provocado por la evaporación de la humedad retenida en el substrato y también por la evaporación que se produce a través de las plantas. Además, aporta otros beneficios relacionados con su capacidad para retener polvo y sustancias contaminantes (Machado *et al.*, 2000). Las investigaciones que se han realizado en los últimos años sobre la instalación de este tipo de cubiertas para la mejora energética de edificios existentes han aportado resultados bastante prometedores (Bosch *et al.*, 2018; Cascone *et al.*, 2018).

Mejora de la calidad de los huecos

Los huecos son los elementos de la envolvente térmica donde se producen las mayores pérdidas energéticas en invierno y las mayores ganancias solares en verano. Además, son también responsables de las pérdidas de calor derivadas de la falta de estanqueidad. Por ello, las intervenciones destinadas a su mejora deben comprender, no solo la sustitución de las carpinterías existentes por otras con mejores prestaciones térmicas sino también la correcta unión de estas a los elementos estancos de la envolvente.

En la elección de las carpinterías es necesario tener en cuenta una serie de parámetros. Así pues, en el caso de los marcos se deberá atender a los valores de transmitancia térmica y absorptividad, y en el caso de los vidrios, se tendrá en cuenta su transmitancia y su factor solar. Los diferentes tratamientos que pueden presentar los vidrios, así como las características y disposición de las cámaras (vidrios dobles, triples, etc.) tienen como objetivo mejorar estos parámetros. A su vez, se deberá prestar atención a la permeabilidad de todo el hueco en su conjunto, para garantizar así su estanqueidad.

La sustitución de las carpinterías supone, generalmente, una gran mejora del comportamiento energético de la envolvente. Además, se trata de una actuación bastante rápida y que, en comparación con otras, ocasiona pocas molestias a los usuarios. Esto la convierte en una de las primeras opciones a contemplar en las actuaciones de mejora de la eficiencia energética de los edificios existentes (Asociación Nacional de Industriales de Materiales Aislantes e IDAE, 2019).

Protección solar

Los dispositivos de protección solar permiten controlar y regular la cantidad de radiación que penetra por los huecos de la envolvente. La eficiencia del sistema dependerá de una correcta elección del tipo de protección y un dimensionado acorde al recorrido del sol y a las necesidades de sombra del paramento en cuestión. Las cartas solares y los climogramas de bienestar ofrecen información precisa sobre estas cuestiones.

Una de las grandes ventajas de estos sistemas es que permiten que la interrupción del flujo de energía se produzca antes de su incidencia en el edificio. De esta forma, la radiación obstruida puede disiparse en el aire exterior (Vázquez Gutiérrez *et al.*, 1997).

Aunque en la normativa solo se contemplan para los huecos de fachada, en climas con intensa radiación solar, como en el caso de Sevilla, resultan de utilidad para proteger los elementos opacos de la envolvente (tanto de cubiertas como de fachada), disminuyendo así su temperatura superficial (Vázquez Gutiérrez *et al.*, 1997).

Las estrategias de protección son múltiples y muy diversas. Desde aleros y pérgolas a elementos móviles de toldos y celosías, pasando por el empleo de elementos vegetales (figura 3.3). En el mercado existe infinidad de opciones. Además, pueden llegar a suponer una reducción muy significativa en la demanda de refrigeración. A ello hay que sumar que su instalación, en la mayoría de los casos, es bastante sencilla y rápida.

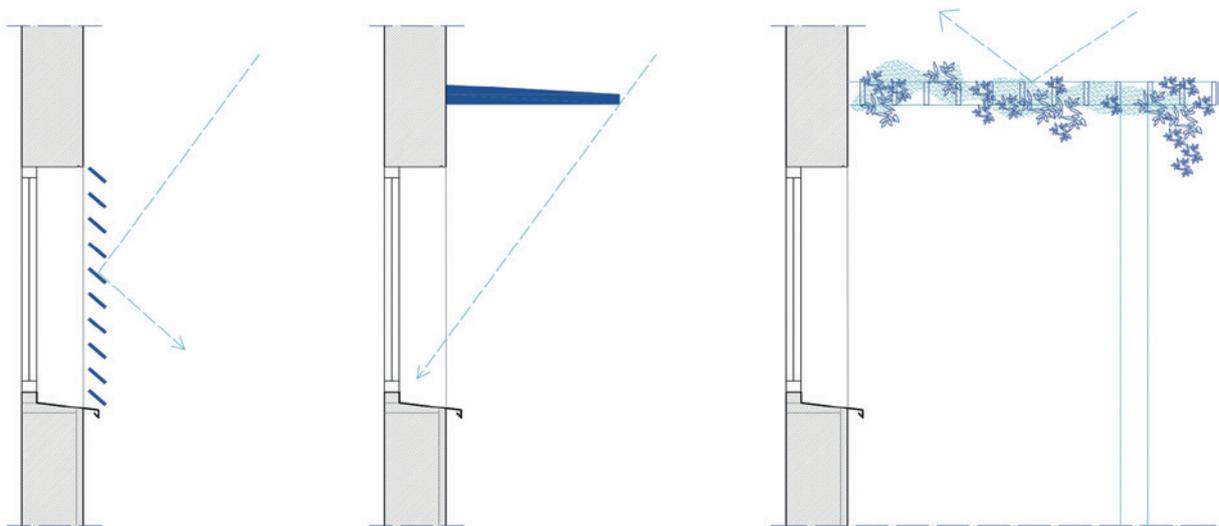


Figura 3.3. Diferentes estrategias de protección solar. Elaboración propia

Incremento de inercia térmica

La inercia térmica se puede definir como la capacidad de un cuerpo de almacenar calor en su interior (Navarro Casas, 1999) o también como la dificultad que ofrece para cambiar el estado en el que se encuentra (Neila González, 2004). Por ello, un cerramiento con gran inercia térmica permitirá mantener el local a temperatura constante a pesar de los cambios térmicos que se produzcan en el exterior. Esta característica presenta una vinculación directa con la masa térmica y su aprovechamiento es uno de los procedimientos más empleados por la arquitectura vernácula para conseguir la estabilidad térmica. Sus beneficios son especialmente significativos en las condiciones de verano.

Para aumentar la inercia térmica de un edificio se requiere, en general, la incorporación de grandes masas, que suponen un volumen y un peso considerable. Por ello, no es sencillo llevar a cabo estrategias de este tipo en edificios existentes. No obstante, en los últimos años, el desarrollo de nuevos morteros con materiales de cambio de fase en su composición ha permitido plantear soluciones que aportan inercia térmica con muy poco peso y espesor.

Los materiales de cambio de fase se caracterizan por acumular grandes cantidades de energía en forma de calor latente. Este tipo de almacenamiento se realiza sin aumentar la temperatura, de forma que tampoco aumentan las pérdidas energéticas derivadas de ello. Además, la carga y descarga de energía se realiza a temperatura constante (Neila González y Acha Román, 2009). Los morteros fabricados a partir de estos materiales poseen una inercia térmica muy superior a la de un mortero convencional y presentan una densidad menor (Bartolomé *et al.*, 2020). En los últimos años, diversos estudios han comprobado la efectividad de estos morteros en diferentes soluciones constructivas (Bartolomé *et al.*, 2020).

Sistemas de captación solar

Para la captación de la energía solar se pueden emplear diferentes tipos de estrategias. Las propias ventanas y lucernarios de nuestros edificios son sistemas de captación solar. Sin embargo, en este apartado nos referiremos a aquellos sistemas más complejos que, además de captar esta energía, permiten su distribución y acumulación. Entre las posibles estrategias, nos centraremos en los invernaderos adosados y los muros Trombe.

La estrategia del invernadero adosado consiste en un espacio acristalado, donde se produce la captación solar mediante el efecto invernadero, separado de la fachada mediante un elemento con aberturas en la parte superior e inferior (figura 3.4). El aire, al calentarse asciende por convección y, por las aberturas superiores pasa al interior de la habitación contigua (Neila González y Acha Román, 2009). Esta corriente de aire es capaz de arrastrar el aire frío de la habitación, que se encuentra a nivel del suelo, al interior del invernadero. De modo que se crea una circulación de aire entre el invernadero y la habitación contigua.

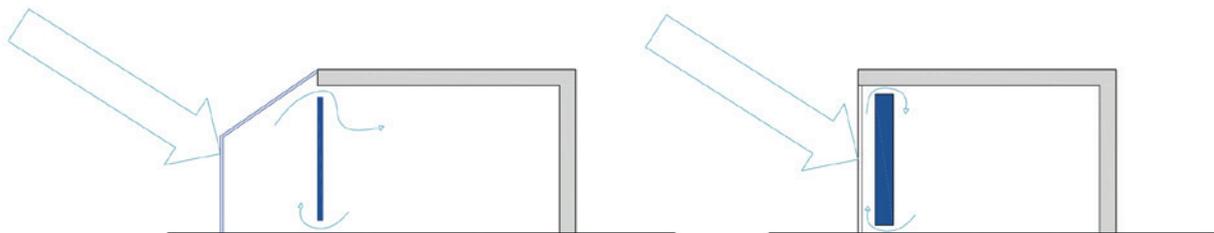


Figura 3.4. Representación esquemática del funcionamiento del invernadero (izquierda) y el muro Trombe (derecha). Elaboración propia basada en la figura 4.1. de Neila González (2004)

El muro Trombe consiste en una especie de invernadero de dimensiones mucho más pequeñas que además permite la acumulación de energía (figura 3.5). Consta de una cámara de aire confinada entre una hoja exterior de vidrio y un muro interior de gran espesor y densidad en el que se produce la acumulación (Neila González, 2004). Al igual que en el caso de los invernaderos, dispone de una serie de aberturas en la parte inferior y superior del muro que posibilitan la corriente de aire convectiva por la que se produce la distribución del aire caliente al interior del edificio. En algunos casos también se incluyen aberturas en la hoja de vidrio (Simões *et al.*, 2021).

Estos sistemas fueron concebidos para la calefacción pasiva de los edificios. No obstante, varios autores (Simões *et al.*, 2021; Stazi *et al.*, 2011) han comprobado que, combinado con la instalación de determinados dispositivos de protección solar, como es el caso de voladizo y persiana

exterior (deberá permanecer bajada en las horas de radiación solar), se produce una ventilación nocturna que expulsa el aire más cálido al exterior, a la vez que se evita el sobrecalentamiento diurno. Estudios recientes han demostrado su buen comportamiento en climas mediterráneos, proporcionando incluso reducción de la demanda de refrigeración (Simões *et al.*, 2021).

La implementación de estos sistemas en las intervenciones sobre edificios existentes supone una importante transformación de las fachadas que no siempre es viable. No obstante, en intervenciones de gran alcance que supongan una significativa remodelación de estas, su incorporación puede resultar muy interesante.

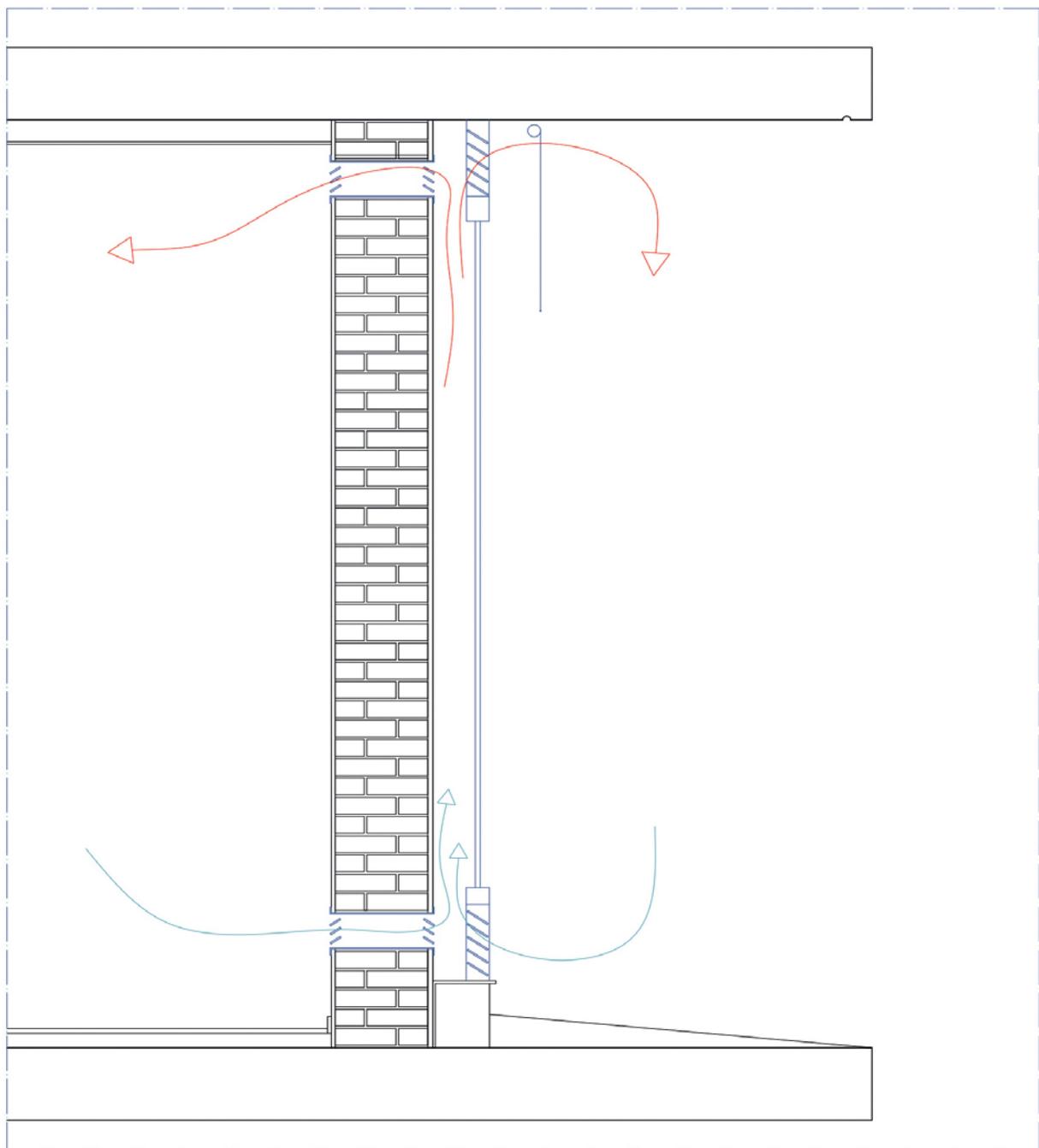


Figura 3.5. Ejemplo de muro Trombe con estrategias para evitar el sobrecalentamiento. Elaboración propia

Sistemas de ventilación natural y enfriamiento

En este apartado incluimos aquellas estrategias específicamente concebidas para la reducción de la demanda de refrigeración. A partir de lo indicado en Neila González (2004) podemos dividir las en dos grandes grupos: las orientadas a eliminar el sobrecalentamiento y las que persiguen directamente el enfriamiento de los edificios.

Las medidas orientadas a eliminar el sobrecalentamiento están todas relacionadas con la ventilación. Entre las estrategias de este tipo que se pueden llevar a cabo en la rehabilitación de edificios se encuentran las chimeneas solares o los pozos canadienses.

Entre las estrategias directas de enfriamiento se incluyen aquellas que aprovechan el enfriamiento evaporativo del agua, las que provocan el enfriamiento a partir del intercambio de calor por radiación con la bóveda celeste (techos fríos, cubiertas húmedas) y las que ceden calor al terreno mediante conducción.

3.2.3. Medidas para la mejora de la eficiencia de las instalaciones

Una vez reducida la demanda energética, se debe procurar que la energía necesaria para satisfacerla sea la mínima posible. Para ello, es necesario contar con instalaciones que ofrezcan un comportamiento eficiente y permitan la recuperación de energía, así como la utilización de las energías renovables y las energías residuales (Ministerio de la Presidencia, 2021).

Teniendo en cuenta la propia definición de eficiencia energética de la Directiva Europea 2002/91 (Parlamento Europeo, 2002), las instalaciones que se consideran en el control de la eficiencia energética de los edificios son las de calefacción, refrigeración, ventilación, agua caliente sanitaria (ACS) e iluminación.

Para poder explicar las diferentes estrategias de eficiencia de cada una de estas instalaciones, es necesario abordar con detenimiento cada uno de los tipos de sistemas, teniendo en cuenta los diferentes elementos que los componen. Debido a la extensión que esto supone y al hecho de que el objetivo de este proyecto no incluye la mejora de las instalaciones, no profundizaremos en ello. Simplemente hay que señalar que para lograr una mejora de la eficiencia energética de las instalaciones es necesario contar con un diseño, cálculo y ejecución adecuado de los sistemas, pero también se deberá llevar a cabo un correcto mantenimiento y un uso racional de los mismos.

3.3. MEDIDAS PARA LA MEJORA DEL COMPORTAMIENTO SÍSMICO

En España, la gran mayoría de los edificios existentes se construyeron antes de la aplicación de códigos sísmicos. Por tanto, en su proceso de diseño y construcción, no se tuvieron en cuenta consideraciones sísmicas (Manfredi y Masi, 2017). En algunos casos sí se implementaron algunas medidas establecidas en normativas y directivas establecidas según el sistema estructural. Sin embargo, estas no eran restrictivas como los requerimientos establecidos en las normativas actuales y se seguían fundamentalmente a modo de recomendación. Por tanto, una gran parte

de los edificios existentes no cumplen con los porcentajes de daño sísmico esperado, siendo superiores a lo establecido.

Para intentar cumplir con los requisitos actuales, y mejorar así el comportamiento estructural y sísmico de los edificios, la rehabilitación sísmica surge como la alternativa más óptima (O'Reilly y Sullivan, 2018). Tal y como establece la parte 3 del Eurocódigo-8 (EC8-3) (AENOR, 1998), la rehabilitación sísmica de edificios es necesaria para cumplir con los requisitos relativos al nivel de seguridad sísmica de edificios. Por ello, en las últimas décadas el interés por el desarrollo del concepto de refuerzo sísmico se ha incrementado considerablemente. Este creciente interés se debe principalmente a los efectos catastróficos derivados de diferentes terremotos sufridos en varios países europeos (Perrone *et al.*, 2015).

Las técnicas de refuerzo sísmico se dividen o clasifican según la tipología o sistema estructural para el que están diseñadas. Principalmente, existen tres grandes grupos de tipologías estructurales: estructuras de hormigón armado (HA), de muros de carga o metálicas.

3.3.1. Edificios de estructura de hormigón armado

Existe una gran cantidad de estudios sobre la mejora del comportamiento sísmico de los edificios de hormigón armado. En la normativa americana ATC-40 (Applied Technology Council [ATC], 1996), se elaboró una clasificación de las estrategias de refuerzo sísmico aplicadas a esta tipología estructural (figura 3.6). Esta es la clasificación más primitiva de técnicas de refuerzo y es normalmente usada a la hora de realizar intervenciones en este tipo de estructuras. El objetivo de esta clasificación es establecer las diferentes estrategias de intervención/rehabilitación sísmica específicas para estructuras de pórticos de HA. Entre estas, las más implementadas son el refuerzo y rigidización de los sistemas, la mejora de la capacidad de deformación y la reducción de la demanda sísmica.

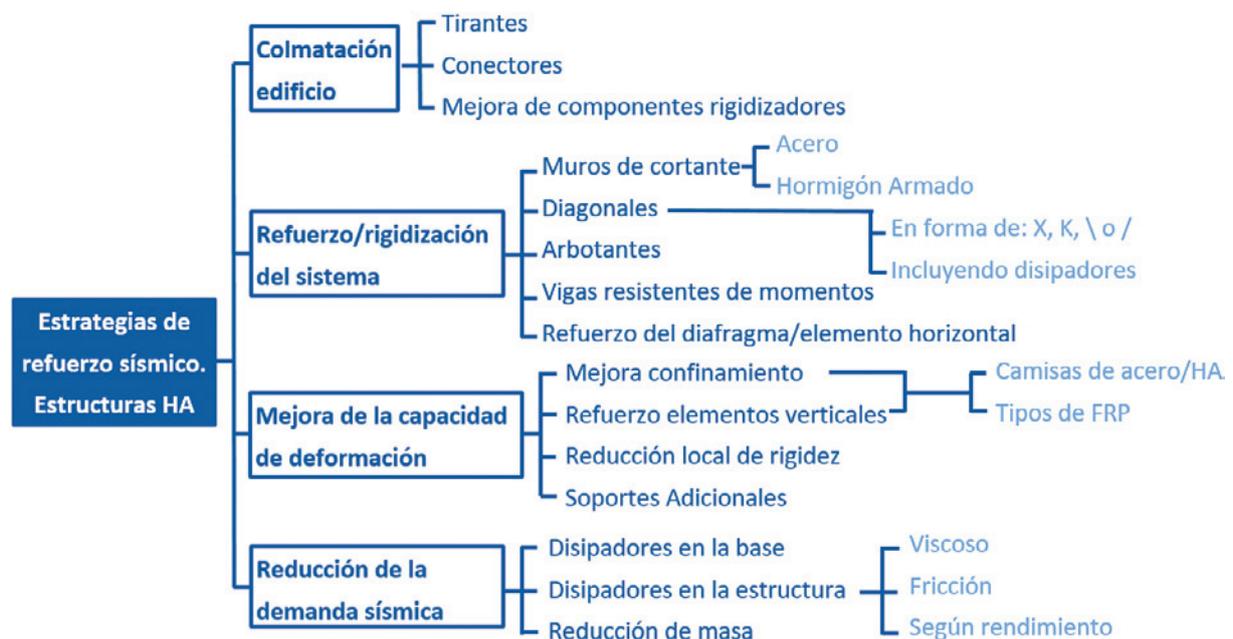


Figura 3.6. Clasificación de las estrategias de rehabilitación sísmica aplicadas a edificios de estructura de HA

Las estrategias de refuerzo y rigidización son las más empleadas en la rehabilitación sísmica. Se basan fundamentalmente en la adición de muros de cortante, arriostramientos o pórticos internos, entre otras técnicas. En Fardis *et al.* (2013) se estudiaron los efectos de la incorporación de muros de cortante en edificios de HA (figura 3.7). Se concluyó que el problema fundamental de estos muros es la dificultad de construcción de los mismos y el coste adicional que supone la construcción de la cimentación. Para intentar solucionar este problema, los autores propusieron un nuevo sistema que permitía evitar la construcción de una cimentación propia, aunque los porcentajes de mejora del comportamiento global disminuyeron. Asimismo, en Pincheira y Jirsa (1995), se realizó una comparación entre los efectos de la implementación de muros armados y arriostramientos. Se obtuvo como resultado valores de capacidad mayores para los modelos con arriostramientos en lugar de los modelos con muros armados.

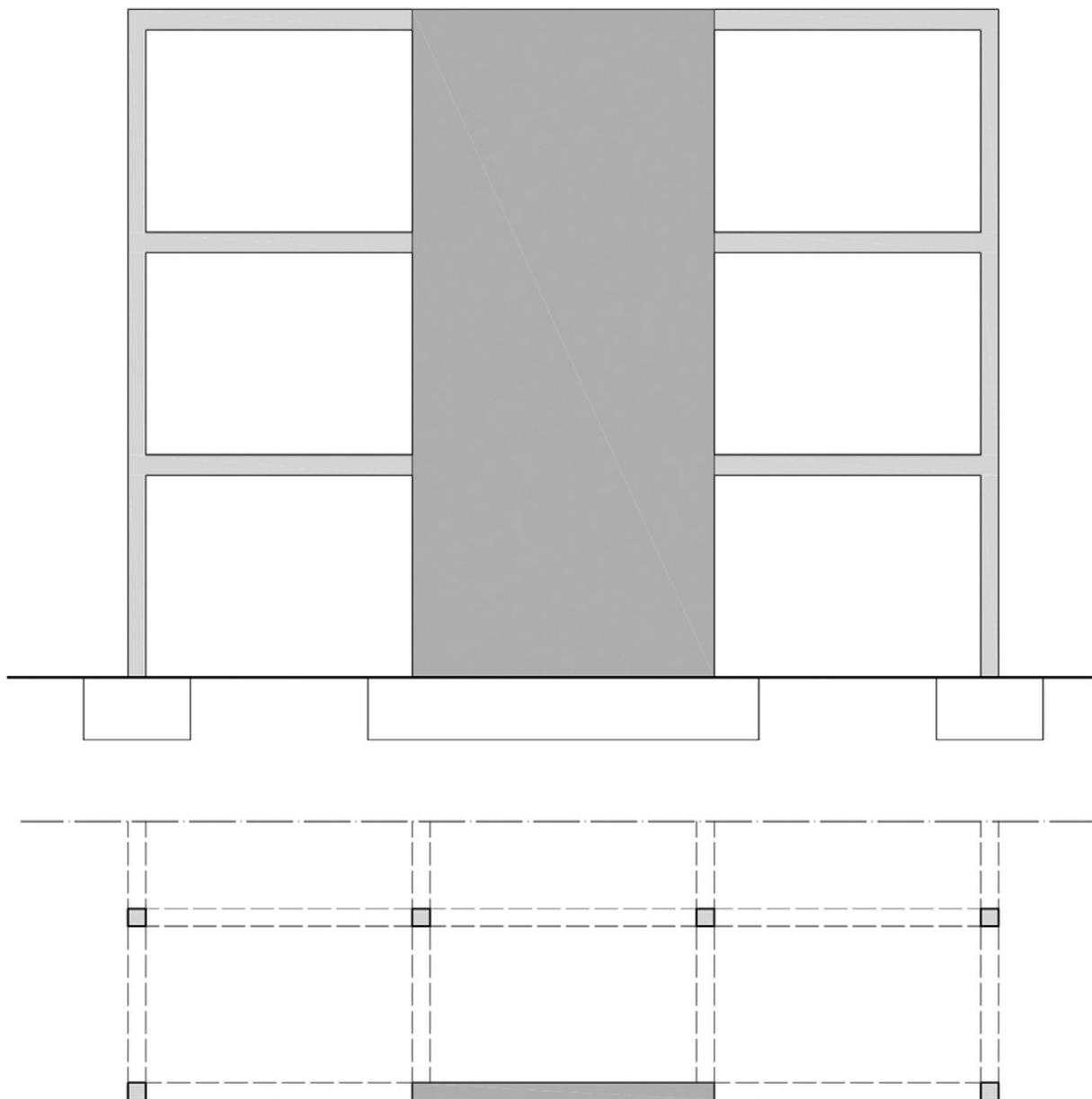


Figura 3.7. Rigidización mediante pantallas de hormigón armado

La implementación de cruces o diagonales, normalmente metálicas (figura 3.8), en pórticos de HA se ha estudiado con amplitud, como se muestra en TahamouliRoudsari *et al.* (2017). En este trabajo, así como en otros, se concluyó que esta técnica siempre aumenta la rigidez y resistencia de las estructuras. Esta conclusión también se obtuvo en Ozcelik *et al.* (2012, 2013), donde se estudiaron incluso tirantes tipo *chevron*. Este sistema emplea una menor cantidad de material de refuerzo, obteniendo resultados positivos en cuanto a mejora del comportamiento. Esta técnica se estudió también en Requena-Garcia-Cruz *et al.* (2019) y en Romero-Sánchez *et al.* (2020), concluyendo que los porcentajes de mejora que suponen su implementación son muy superiores al resto de técnicas a pesar de su considerable impacto arquitectónico.

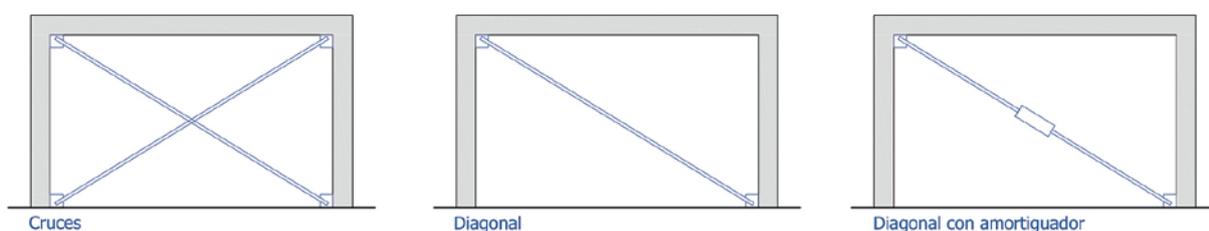


Figura 3.8. Rigidización mediante cruces o diagonales.

En muchos estudios sobre la implementación de cruces o diagonales se incluyen sistemas de disipación de energía (amortiguadores) en los propios elementos de refuerzo. Los efectos de diferentes tipos de amortiguadores han sido analizados en diferentes estudios: fluido viscoso en Sorace y Terenzi (2008), fricción en Kim y Shin (2017) o rendimiento. Este último tipo de amortiguadores se pueden dividir según el elemento de disipación. Pueden ser placas de acero denominadas TADAS y YADAS, redondos de acero, panales o ranuras (Oh *et al.*, 2009). Además, estos sistemas se pueden agregar en diferentes pórticos, ya sean internos o externos o en vertical. En Ozcelik *et al.* (2011) se incluyó un dispositivo amortiguador de rendimiento del tipo TADAS y se concluyó que el dispositivo aumentó el comportamiento sísmico. Sin embargo, esta mejora podía estar limitada por la resistencia al cortante (horizontal) de las uniones viga-pilar de hormigón armado.

La mejora de la capacidad de deformación también se ha analizado ampliamente. Esta estrategia se centra en la implementación de diferentes elementos para la mejora del confinamiento en las uniones viga-pilar (figura 3.9). Entre las técnicas más empleadas, se encuentran la implementación de camisas de acero, de HA o de fibras de polímeros conocidas comúnmente como *fiber reinforced polymers* (FRP). En Valente y Milani (2018) se estudiaron numerosas técnicas basadas en esta estrategia. Se concluyó que la posición en la que se disponen es fundamental para evitar empeorar el comportamiento del edificio, generando, por ejemplo, efectos torsionales desfavorables adicionales. Esta conclusión ha sido obtenida en otros estudios similares (Colomb *et al.*, 2008; di Ludovico *et al.*, 2008).

La estrategia basada en la reducción de la demanda sísmica se basa en la incorporación de sistemas de amortiguación en la base de los edificios o en la propia estructura. La primera técnica es más novedosa que la segunda y se está empezando a implementar en diferentes

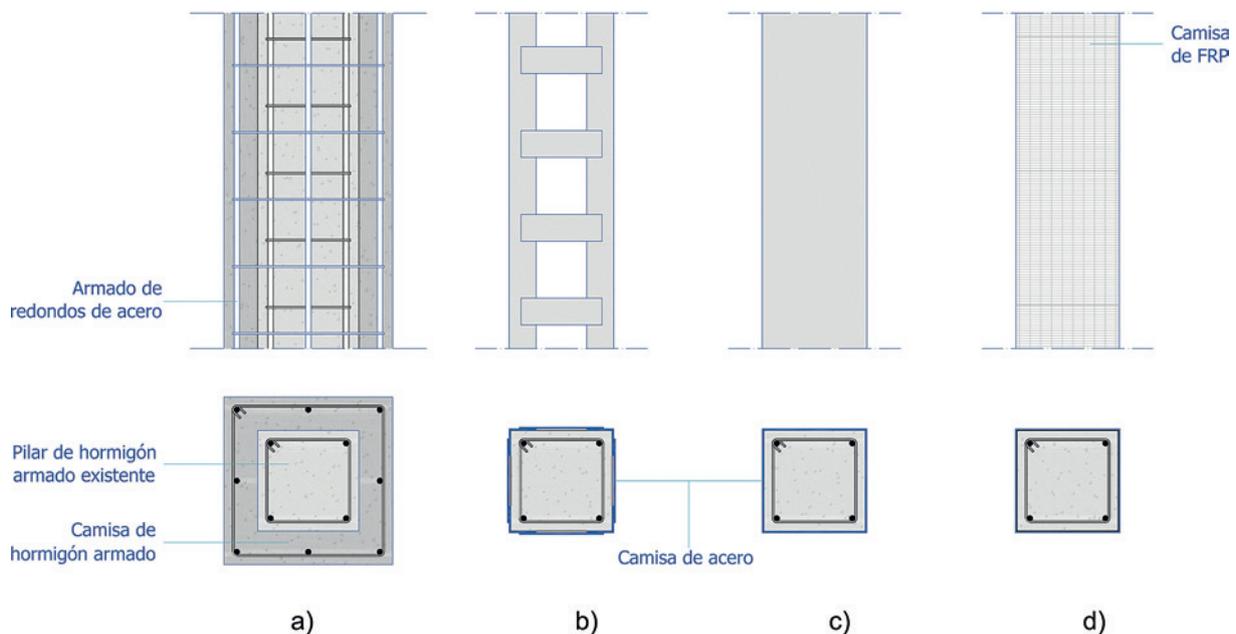


Figura 3.9. Confinamiento de pilares mediante camisa de hormigón armado, acero y FRP

casos de estudio (Pampanin *et al.*, 2006). También en Sorace y Terenzi (2009, 2012) se incorporó un sistema de arriostramiento con amortiguador viscoso fluido, obteniendo mejoras del comportamiento sísmico de hasta un 30% lo que resultó en una mejora de hasta un 30%. En cualquier caso, esta estrategia se recomienda que sea empleada en edificios de gran altura y tamaño, dado que los porcentajes de mejora son muy superiores pese a los elevados costes de implementación y mantenimiento. Los edificios caso de estudio del proyecto RENERSIS son de una superficie pequeña y de baja altura. Además, la demanda sísmica en el área de estudio es moderada. Por tanto, en este caso, esta estrategia no es óptima para ser implementada en los edificios.

Además, se han desarrollado recientemente técnicas de refuerzo no-invasivas, como en Requena-García-Cruz *et al.* (2021). Estas pretenden ser soluciones con un mínimo impacto arquitectónico, así como una mínima interrupción el uso del edificio durante su construcción y costes de construcción y mantenimiento bajos. En Sasmal y Nath (2017) la efectividad de soluciones de refuerzo sísmico no-invasivas basadas en la implementación de diagonales metálicas individuales en los nudos de HA fue analizada. Se concluyó que el ángulo de posición de estas soluciones es fundamental para obtener porcentajes de mejora superiores. En Kanchana Devi *et al.* (2018) se implementaron diferentes tipos de cartelas de acero en los nudos de HA de una estructura de pórticos. Se obtuvo que el número de anclajes permite mejorar el comportamiento sísmico. En Pampanin *et al.* (2006) y Truong *et al.* (2017) se realizaron pruebas experimentales para validar un sistema de cartelas de acero similar al estudiado numéricamente anteriormente.

Estas estrategias y técnicas de refuerzo sísmico también han sido analizadas desarrollando nuevos algoritmos de cálculo que permiten obtener las soluciones más óptimas. En Seo *et al.* (2018) se presentó un nuevo algoritmo para obtener la cantidad y la posición en la que se necesita el material de refuerzo.

3.3.2. Edificios de estructura de muros de carga

Generalmente, el estudio del modelado y refuerzo sísmico de los edificios de muros de carga (normalmente de fábrica cerámica o de piedra) se ha abordado desde distintos puntos de vista: el microanálisis y el macroanálisis. En el modelo de microanálisis, se emplean modelos específicos y exhaustivos del comportamiento del material, usualmente en tres dimensiones. Requieren normalmente de ensayos experimentales para calibrar y validar los modelos. Para el modelo de macroanálisis, existen varias técnicas de trabajo, normalmente se proponen nuevos materiales continuos que combinan la elasticidad y la plasticidad anisotrópicas (Lourenço *et al.*, 1995).

Un modelo muy empleado en las investigaciones sobre la vulnerabilidad y el riesgo sísmico de edificios de muros de carga de fábrica es el modelo de macroelementos basado en el modelo de pórtico equivalente. Mediante este modelo, se describe el comportamiento mecánico no lineal en el plano de los muros y se evalúa el daño esperado y los modos de fallo en los edificios (Bonett *et al.*, 2004). Para realizar el modelo de pórtico equivalente, el muro de carga se subdivide en un conjunto de paneles deformables, en los que se concentran la deformación y la respuesta no lineal, y unas partes rígidas, que conectan las deformables. Este enfoque requiere un número limitado de grados de libertad, y permite el análisis de modelos tridimensionales complejos de estructuras de muros de carga. Además, permite combinar los muros con otros elementos estructurales, como vigas o pilares de hormigón armado, lo cual lo hace particularmente versátil para modelar también estructuras mixtas (Lagomarsino y Magenes, 2009a).

La caracterización de los muros de fábrica de ladrillo es compleja debido a la existencia de dos materiales (ladrillo y mortero) con distintas propiedades mecánicas y una superficie de unión entre ellos que influye en el comportamiento mecánico del conjunto. La presencia de estas juntas de mortero es el origen de la no linealidad de la fábrica y de su comportamiento, lo cual conduce a diferentes mecanismos de rotura, uno asociado al fallo por tracción (modo I) y otro asociado al fallo por cortante (modo II) (Orduña y Ayala, 2001).

Los edificios de muros de carga presentan una alta vulnerabilidad sísmica debido a su fecha de construcción, la falta de diseño sísmico y la degradación de los materiales constructivos y estructurales (Lagomarsino *et al.*, 2021). La rehabilitación sísmica juega un papel clave en la reducción de la vulnerabilidad de los edificios a través de la adopción de medidas de mitigación de riesgos (D'Alpaos y Bragolusi, 2022). Para ello se han propuesto diversas estrategias y técnicas, las cuales han sido analizadas experimental y numéricamente.

La rehabilitación sísmica de los edificios de muros de carga se basa fundamentalmente en cuatro estrategias principales (Segovia-Verjel *et al.*, 2019): i) refuerzo de las uniones muro-muro y muro-diafragma horizontal; b) aumento de la rigidez del diafragma; c) mejora del comportamiento fuera del plano mediante la implementación de tirantes o vigas tipo anillo; y, d) refuerzo de muros de mampostería. Dependiendo de la configuración y el comportamiento de la estructura de muros de carga, las estrategias de refuerzo pueden ser más o menos adecuadas. Estas se basan fundamentalmente en mejorar el comportamiento fuera del plano o en el plano para evitar el fallo (Rodrigues *et al.*, 2022). El primer grupo engloba técnicas basadas en la mejora de las conexiones horizontales. En Guerrini *et al.* (2021) se probaron experimental y numéricamente diferentes técnicas para la mejora de las conexiones muro-muro y de muro-diafragma, entre otros ejemplos. El segundo grupo se basa en el refuerzo de los muros y huecos.

Los edificios de muros de carga caso de estudio se construyeron durante la década de los 60-70 y generalmente presentan diafragmas rígidos, vigas anillo o de borde y buenas conexiones entre muros y forjados. Por tanto, las técnicas más óptimas serán aquellas que se centren en la mejora de la resistencia de los propios muros para evitar el fallo en el plano.

Un amplio estudio sobre la evaluación y la reducción de la vulnerabilidad en edificios de muros de carga fue llevado a cabo en Italia en 2009. En él participaron 19 universidades italianas y abordaron temas como la evaluación de estructuras agregadas a edificios, los métodos de evaluación de estructuras mixtas de hormigón y muro de carga, las distintas metodologías para modelar las estructuras de muro de carga y las técnicas de refuerzo a aplicar en estas estructuras. Las técnicas de rehabilitación propuestas fueron muy variadas, desde inyecciones de mortero destinadas a mejorar la cohesión entre bloques, rejuntado simple o reforzado con mallas metálicas, impregnado del muro con distintos tipos de mezclas, etc. Además estudiaron cómo mejorar las conexiones entre muros y forjados y evaluaron la introducción de diafragmas rígidos, determinando los casos en los que puede resultar inadecuado para este tipo de estructuras (Lagomarsino y Magenes, 2009b).

En un estudio posterior se llevó a cabo una evaluación numérica de la influencia de algunos parámetros en la resistencia lateral de los muros de carga sometidos a cargas en el plano. Estos parámetros fueron el nivel de precompresión, la relación de aspecto, la proporción de refuerzo vertical y horizontal mediante barras de acero y las condiciones de contorno. El modelo numérico se validó mediante la realización de pruebas experimentales de muros sometidos a carga lateral cíclica. Los resultados numéricos revelaron que las condiciones de contorno desempeñan un papel fundamental en el comportamiento lateral de los muros y determinaron la influencia del nivel de precompresión, así como la relación de aspecto. El refuerzo mediante barras de acero verticales no tuvo prácticamente ninguna influencia en la resistencia a cortante de los muros pero el refuerzo horizontal sí mejoró dicha resistencia (Haach *et al.*, 2011).

Entre las soluciones de mejora del comportamiento de los muros en el plano, la implementación de mallas de acero o de fibras poliméricas sobre el paramento son las más usadas (Segovia-Verjel *et al.*, 2019). Recientemente, se ha propuesto un nuevo material de tipo *composite* que combina fibras poliméricas con capas de mortero.

Mallas de acero

Las mallas de acero añadidas sobre los paramentos de mampostería es una de las técnicas de refuerzo sísmico y estructural más convencionales (Abeling *et al.*, 2018) (figura 3.10). Suelen combinarse con la técnica del hormigón proyectado para añadir capas de mortero tal y como se ha analizado y validado experimentalmente en Shabdin *et al.* (2018). En Kadam *et al.* (2014) se combinaron con capas de micro-hormigón también proyectado. En Spinella (2018) se probó un sistema innovador constituido por una malla de acero inoxidable pretensada y se añadió a un muro de mampostería a escala real. Se concluyó que esta solución podría aumentar considerablemente la resistencia y ductilidad del muro. En Garcia-Ramonda *et al.* (2022) se realizaron ensayos experimentales cíclicos en muros de mampostería reforzados con mallas de acero de una y dos capas. Cuanto más material de refuerzo, mayores cargas y desplazamientos impuestos se podían soportar, demostrando la eficacia de la técnica de refuerzo.

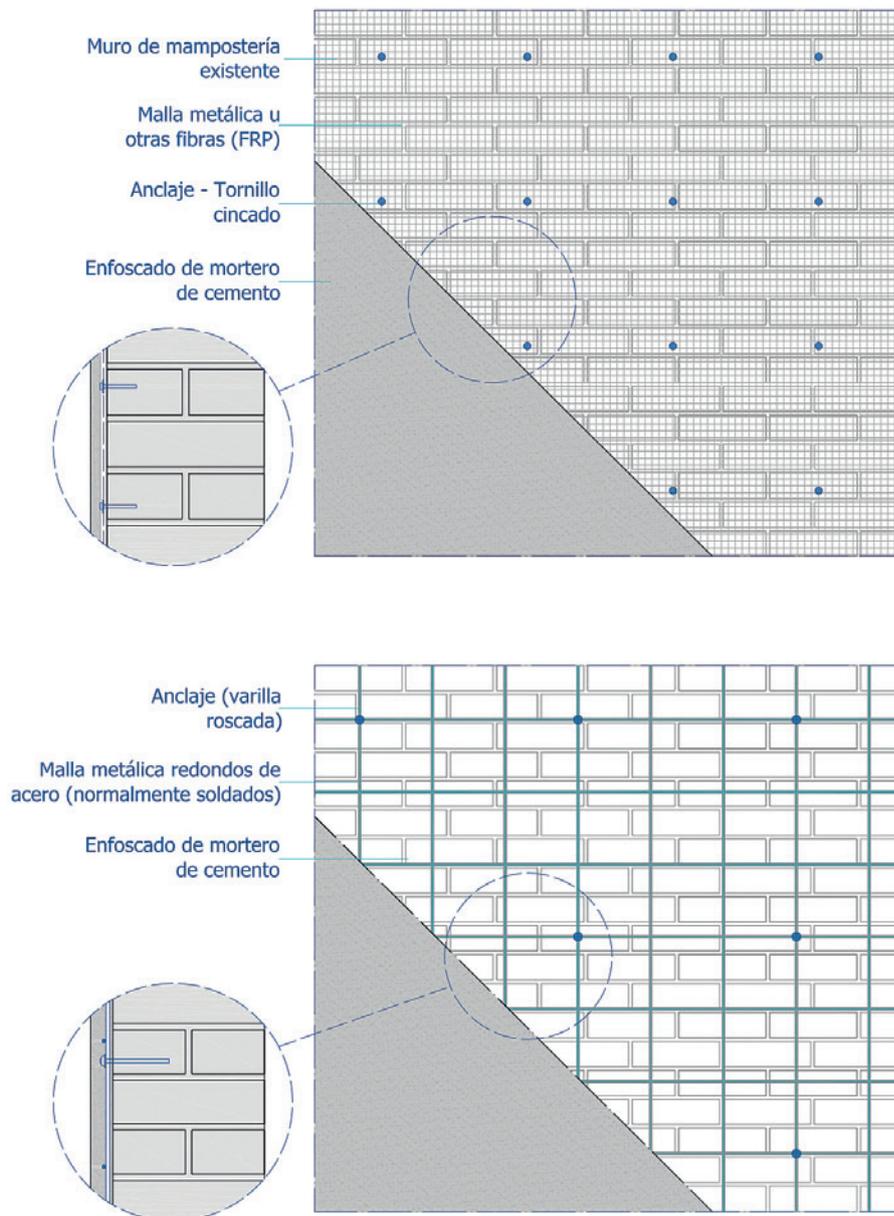


Figura 3.10. Refuerzo mediante mallas de acero

Marcos de acero

El refuerzo de los huecos mediante la incorporación de un recercado de perfiles de acero (figura 3.11). Se trata de un sistema muy eficaz para la mejora del comportamiento en el plano de edificios de mampostería. Además, se trata de un sistema que se puede combinar con la implementación de nuevas carpinterías que mejoren el comportamiento energético del edificio. Es importante resaltar que se trata de un sistema que no tiene un impacto arquitectónico en el edificio, ya que queda totalmente integrado en el muro. En J. M. Proença *et al.* (2019) esta solución fue añadida para rigidizar la abertura y validada a través de una serie de pruebas experimentales. En Segovia-Verjel *et al.* (2019) este sistema se evaluó numéricamente y se aplicó a un edificio de estudio de caso, siendo la solución más efectiva en comparación con la adición de mallas de acero.

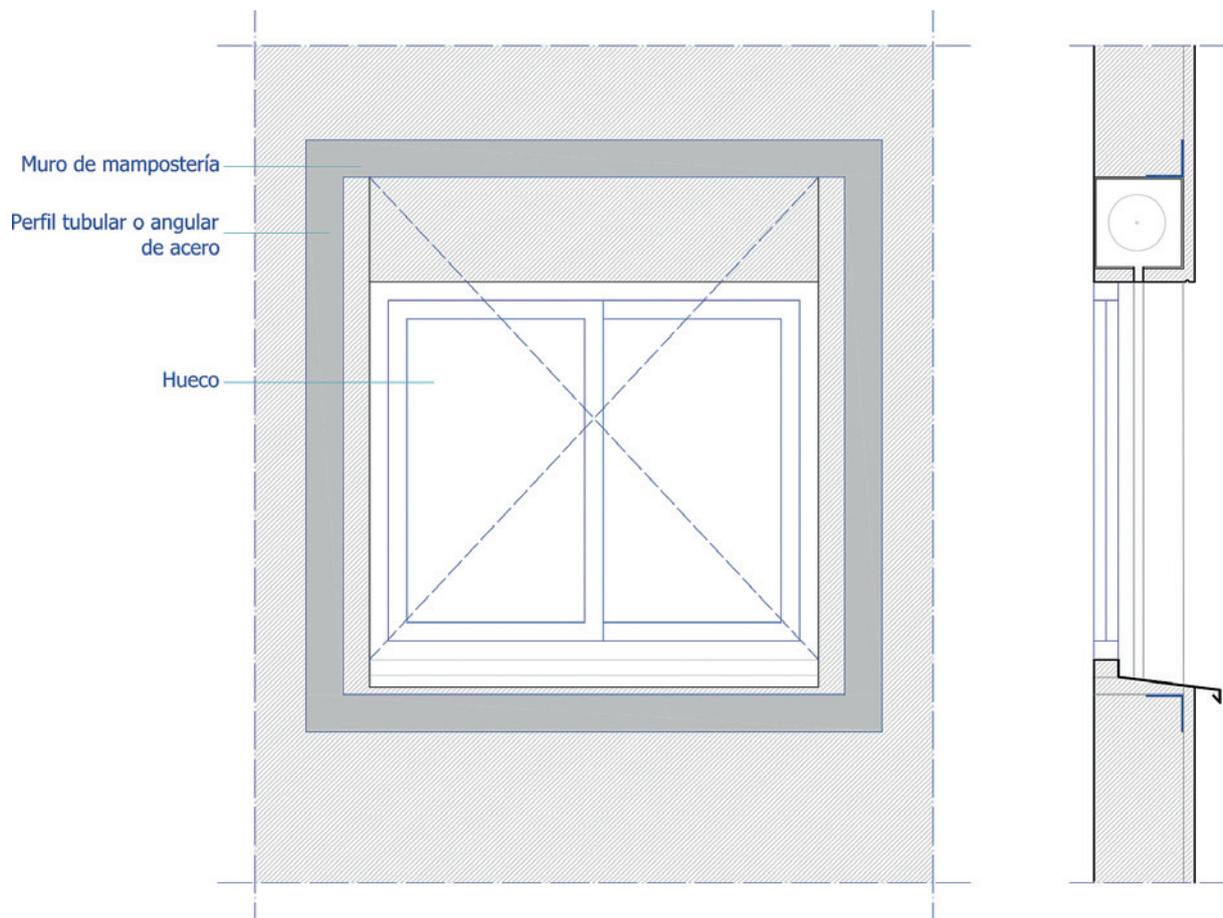


Figura 3.11. Recercado de hueco mediante perfiles de acero laminado

Fibras de polímeros (FRP)

Numerosas investigaciones han abordado el refuerzo de muros de carga de fábrica mediante polímeros reforzados con FRP. Estos estudios se han realizado mediante ensayos dinámicos con mesa vibradora, unos sobre paños simples de muros y otros sobre muros confinados por otros, representando mejor las condiciones de contorno reales. Mediante la comparación entre los muros reforzados y sin reforzar, se evalúa la capacidad estructural del refuerzo para ver el efecto de mejora frente al sismo (Bae *et al.*, 2010). En algunos casos se ha evaluado la influencia del refuerzo de estructuras de muros de carga de fábrica ante cargas fuera del plano (Sistani Nezhad *et al.*, 2016).

Algunos estudios han realizado una comparación entre distintos tipos de refuerzos, por ejemplo, mortero de cemento reforzado con fibra, Fabric-Reinforced Cementitious Matrix (FRCM), frente a los sistemas de polímeros reforzados con fibra, Externally Bonded Fiber Reinforced Polymers (EB-FRP) (Bilotta *et al.*, 2017), o polímeros reforzados con fibra de vidrio Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP) frente a polímeros reforzados con fibra de carbono Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) (Gams *et al.*, 2017). Esta última solución se encuentra entre las más empleadas. En Martinelli *et al.* (2016), se presentó un programa experimental para mejorar el comportamiento en el plano de muros de mampostería de ladrillo a partir de esta técnica.

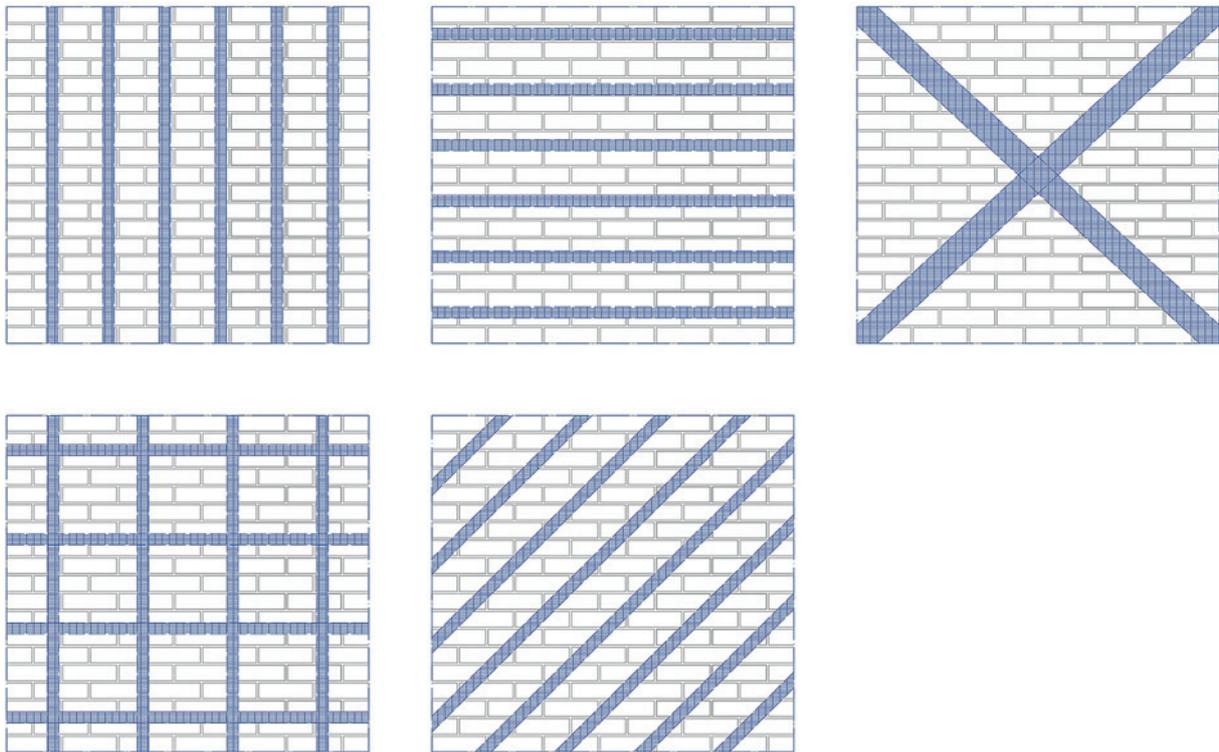


Figura 3.12. Diferentes configuraciones de refuerzo mediante bandas de FRP

También se han comparado los refuerzos de polímeros con otro tipo de refuerzo realizado con polipropileno, incluso con la acción conjunta de ambos, utilizando una baja proporción de FRP (Saleem *et al.*, 2016).

El FRP combinado con capas de mortero mejora la resistencia de los paneles y previene el fallo por cortante diagonal de los muros (figura 3.12). En Petrovčič y Kilar (2020) y Proença *et al.* (2012) se analizó paramétricamente y numéricamente la efectividad de diversas soluciones que implementaban FRP para mejorar la resistencia sísmica global de un muro de fábrica. En Turco *et al.* (2006) se evaluó experimentalmente el refuerzo por flexión y cortante de paneles de mampostería a través de tiras de FRP. Estos trabajos concluyeron que este material presenta una altísima relación resistencia/cantidad de material, alta resistencia a la corrosión y fácil aplicación. Sin embargo, presenta un alto costo económico. Como alternativa a las tiras de FRP, en Bournas (2018) y como resultado de un proyecto financiado por la Unión Europea (Bournas, 2018), se propuso y validó experimentalmente un material compuesto novedoso llamado mortero reforzado con textiles (TRM). Se concluyó que podría obtenerse un porcentaje de mejora similar al FRP si las tiras textiles se añaden y evalúan cuidadosamente.

Morteros reforzados con tejidos (TRM)

El mortero reforzado con tejidos, *Textile-reinforced mortar* (TRM), es un nuevo material compuesto de refuerzo estructural/sísmico que puede ser considerado como una alternativa a los FRP. Este resuelve algunos de los inconvenientes que estos últimos presentan sin comprometer en términos generales sus propiedades mecánicas (Papanicolaou *et al.*, 2007). En él se sustituyen

las resinas epoxi (ligantes orgánicos) por morteros cementosos (ligantes inorgánicos). Esto le confiere un mejor comportamiento a altas temperaturas, mayor permeabilidad al vapor de agua, menores riesgos en la puesta en obra y una mayor compatibilidad con los materiales de las fábricas de ladrillo. Según estos mismos autores (Papanicolaou *et al.*, 2007, 2008), se trata de una solución extremadamente prometedora para el refuerzo estructural de muros de carga de ladrillo, tanto si están sometidos a cargas en el plano como fuera del mismo.

3.3.3. Para edificios de estructura metálica

Los edificios caso de estudio, las edificaciones residenciales de antigua construcción, no presentan estructuras metálicas o mixtas. Por ello, este trabajo no se centra en el estudio pormenorizado de estas estructuras. Sin embargo, existen numerosos trabajos de investigación sobre estrategias y técnicas de refuerzo específicas para edificios de estructura metálica. Además, en la parte 3 del EC8 (AENOR, 1998) se establece una clasificación de estas técnicas, proponiendo soluciones globales o como intervenciones locales.

3.4. CONCLUSIONES

En este capítulo se expone una visión global sobre las diferentes medidas, tanto de refuerzo sísmico como de mejora del comportamiento energético de edificios existentes. Se incluyen las medidas más difundidas, así como otras de reciente publicación, cuyos beneficios en la rehabilitación de edificios ha sido ampliamente demostrados.

Se ha establecido una clasificación de las medidas energéticas que incluye aquellas de uso más extendido con otras que, aunque cuentan con cierto bagaje y extensa literatura científica, su uso no se encuentra generalizado. Además, estas medidas se han clasificado según el aspecto a mejorar: demanda energética o la eficiencia de las instalaciones.

En el caso de las medidas para la mejora del comportamiento sísmico, estas han sido clasificadas según la tipología estructural edificatoria: estructura de hormigón armado, de muros de carga (principalmente de fábrica) y metálica.

En general, se concluye que para la elección se deben tener en cuenta: las características de los edificios, los criterios patrimoniales y económicos, así como otras variables como la reducción de las posibles pérdidas, impactos medioambientales o tiempos de construcción e interrupción del uso del edificio.

3.5. REFERENCIAS

Abeling, S., Dizhur, D. y Ingham, J. (2018): «An evaluation of successfully seismically retrofitted URM buildings in New Zealand and their relevance to Australia», *Australian Journal of Structural Engineering*, 19(3), 234244. <https://doi.org/10.1080/13287982.2018.1491820>

AENOR (1998): *Eurocódigo 8: Proyecto de estructuras sismorresistentes. Parte 3: evaluación y adecuación sísmica de edificios (EC8-3)*. España. <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0060367>

- Applied Technology Council (ATC) (1996): *ATC-40: seismic evaluation and retrofit of concrete buildings*. Estados Unidos. http://digitalcommons.calpoly.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1052&context=cenv_fac
- Arce, P., Castellón, C., Castell, A. y Cabeza, L. F. (2012): «Use of microencapsulated PCM in buildings and the effect of adding awnings», *Energy and Buildings*, 44(1), 88-93. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2011.10.028>
- Asociación Nacional de Industriales de Materiales Aislantes e Instituto para la diversificación y ahorro de la energía (IDAE) (2019): *Soluciones de acristalamiento y cerramiento acristalado* (IDAE, Ed.). España.
- Bae, B. I., Park, B. K., Choi, H. K. y Choi, C. S. (2010): «Retrofitting Effect of Unreinforced Masonry Walls Using FRPs», *Key Engineering Materials*, 452-453, 765-768. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.452-453.765>
- Bartolomé, C., Alarcón, A., Tenorio, J. A. y Bermejo, E. (2020): «Nuevos materiales para incrementar la inercia térmica de edificios existentes para su rehabilitación energética», *Construction Pathology, Rehabilitation Technology and Heritage Management*. www.ietcc.csic.es
- Bilotta, A., Ceroni, F., Lignola, G. P. y Prota, A. (2017): «Use of DIC technique for investigating the behaviour of FRCM materials for strengthening masonry elements», *Composites Part B: Engineering*, 129, 251-270. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.05.075>
- Bonett, R., Barbat, A. H., Pujades, L. G., Lagomarsino, S. y Penna, A. (2004): «Performance assessment for unreinforced masonry buildings in low seismic hazards areas», *13th World Conference on Earthquake Engineering*.
- Bosch, M., Calvo, L., Boleda, M., Cantalapiedra, I. y Lacasta, A. (2018): «Cubiertas verdes y rehabilitación: procesos de participación y cooperación Universidad Empresa», *Construction Pathology, Rehabilitation Technology and Heritage Management*, 491-498. www.epseb.upc.edu
- Bournas, D. A. (2018): «Concurrent seismic and energy retrofitting of RC and masonry building envelopes using inorganic textile-based composites combined with insulation materials: A new concept», *Composites Part B: Engineering*, 148, 166-179. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.04.002>
- Carabaño Rodríguez, R. (2015): *Caracterización y análisis comparativo del comportamiento medioambiental de los materiales de aislamiento térmico utilizados en la envolvente del edificio, en función del sistema constructivo y de la situación geográfica* (Tesis doctoral). Universidad Politécnica de Madrid.
- Cascone, S., Catania, F., Gagliano, A. y Sciuto, G. (2018): «A comprehensive study on green roof performance for retrofitting existing buildings», *Building and Environment*, 136, 227-239. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.03.052>
- Colomb, F., Tobbli, H., Ferrier, E. y Hamelin, P. (2008): «Seismic retrofit of reinforced concrete short columns by CFRP materials», *Composite Structures*, 82(4), 475-487. <https://doi.org/10.1016/J.COMPSTRUCT.2007.01.028>
- D'Alpaos, C. y Bragolusi, P. (2022): «The willingness to pay for seismic retrofitted buildings: A discrete choice experiment», *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 71, 102814. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2022.102814>
- Di Ludovico, M., Prota, A., Manfredi, G. y Cosenza, E. (2008): «Seismic strengthening of an under-designed RC structure with FRP», *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 37(1), 141-162. <https://doi.org/10.1002/eqe.749>
- Emanuela Giancola (2010): *El comportamiento energético de una fachada ventilada de juntas abiertas* (Tesis doctoral). Universidad Politécnica de Madrid.
- Fardis, M. N., Schetakis, A. y Strepelias, E. (2013): «RC buildings retrofitted by converting frame bays into RC walls», *Bull Earthquake Eng*, 11(11). <https://doi.org/10.1007/s10518-013-9435-6>
- Gams, M., Tomazevic, M. y Berset, T. (2017): «Seismic strengthening of brick masonry by composite coatings: an experimental study», *Bulletin of Earthquake Engineering*, 15(10), 4269-4298. <https://doi.org/10.1007/s10518-017-0136-4>
- García-Ramonda, L., Pela, L., Roca, P. y Camata, G. (2022): «Experimental cyclic behaviour of shear masonry walls reinforced with single and double layered Steel Reinforced Grout», *Construction and Building Materials*, 320, 126053. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.126053>
- Guattari, F. (2000): *Las tres ecologías* (Pre-Textos, Ed.). https://www.pre-textos.com/escaparate/product_info.php?products_id=71

- Guerrini, G., Salvatori, C., Senaldi, I. y Penna, A. (2021): «Experimental and Numerical Assessment of Seismic Retrofit Solutions for Stone Masonry Buildings», *Geosciences*, 11(6), 230. <https://doi.org/10.3390/geosciences11060230>
- Haach, V. G., Vasconcelos, G. y Lourenço, P. B. (2011): «Parametrical study of masonry walls subjected to in-plane loading through numerical modelling», *Engineering Structures*, 33(4), 1377-1389. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2011.01.015>
- Ibáñez Iralde, N. S., Pascual, J. y Salom, J. (2021): «Energy retrofit of residential building clusters. A literature review of crossover recommended measures, policies instruments and allocated funds in Spain», *Energy and Buildings*, 252. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111409>
- Instituto para la diversificación y ahorro de la energía (IDAE) (2012): *Sistemas de Aislamiento Térmico Exterior (SATE) para la Rehabilitación de la Envolvente Térmica de los Edificios*. España. https://www.idae.es/sites/default/files/documentos/publicaciones_idae/documentos_12300_guia_sate_a2012_accesible-sdan_df06746b.pdf
- Kadam, S. B., Singh, Y. y Li, B. (2014): «Strengthening of unreinforced masonry using welded wire mesh and micro-concrete – Behaviour under in-plane action», *Construction and Building Materials*, 54, 247-257. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.12.033>
- Kanchana Devi, A. K., Karusala, R., Tripathi, M. y Sasmal, S. (2018): «Novel non-invasive seismic upgradation strategies for gravity load designed exterior beam-column joints», *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 18(2), 479-489. <https://doi.org/10.1016/J.ACME.2017.08.005>
- Kim, J. y Shin, H. (2017): «Seismic loss assessment of a structure retrofitted with slit-friction hybrid dampers», *Engineering Structures*, 130, 336-350. <https://doi.org/10.1016/J.ENGSTRUCT.2016.10.052>
- Lagomarsino, S., Cattari, S. y Ottonelli, D. (2021): «The heuristic vulnerability model: fragility curves for masonry buildings», *Bulletin of Earthquake Engineering*, 19(8), 3129-3163. <https://doi.org/10.1007/S10518-021-01063-7/TABLES/19>
- Lagomarsino, S. y Magenes, G. (2009): «Evaluation and reduction of the vulnerability of masonry buildings», en G. Manfredi y M. Doce (eds.), *The state of Earthquake Engineering Research in Italy*, 1-50, Doppiavoce.
- Lourenço, P. B., Rots, J. G. y Blaauwendraad, J. (1995): «Two approaches for the analysis of masonry structures: micro and macro-modeling», *Heron*, 40(4), 313-340.
- Machado, M., Brito, C. y Neila, J. (2000): «La cubierta ecológica como material de construcción», *Informes de La Construcción*, 52.
- Manfredi, V. y Masi, A. (2017): «Consistency of analysis methods considered in EC8-3 for the seismic assessment of RC existing buildings», *Bulletin of Earthquake Engineering*, 15, 3027-3051. <https://doi.org/10.1007/s10518-016-0070-x>
- Martinelli, E., Perri, F., Sguazzo, C. y Faella, C. (2016): «Cyclic shear-compression tests on masonry walls strengthened with alternative configurations of CFRP strips», *Bulletin of Earthquake Engineering* 201614:6, 14(6), 1695-1720. <https://doi.org/10.1007/S10518-016-9895-6>
- Ministerio de la Presidencia, relaciones con las C. y M. D. (2021): *Real Decreto 178/2021, de 23 de marzo, por el que se modifica el Real Decreto 1027/2007, de 20 de julio, por el que se aprueba el Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios*. España. <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-2021-4572>
- Ministerio de Transportes Movilidad y Agenda Urbana (2022): *Documento Básico Ahorro de Energía. Código Técnico de la Edificación*. España. <https://www.codigotecnico.org/pdf/Documentos/HE/DBHE.pdf>
- Navarro Casas, J. (1999): *La arquitectura y...: introducción al acondicionamiento y las instalaciones*. Bellisco. <https://belliscovirtual.com/arquitectura-en-general/421-la-arquitectura-y-introduccion-al-acondicionamiento-y-las-instalaciones-9788495279132.html>
- Neila González, J. (2004): *Arquitectura Bioclimática en un entorno Sostenible*. Munilla-Lería. España.
- Neila González, J. y Acha Román, C. (2009): *Arquitectura bioclimática y construcción sostenible*. DAPP Publicaciones Jurídicas. España.
- Oh, S.-H., Kim, Y.-J. y Ryu, H.-S. (2009): «Seismic performance of steel structures with slit dampers», *Engineering Structures*, 31(9), 1997-2008. <https://doi.org/10.1016/J.ENGSTRUCT.2009.03.003>

- Orduña, A. y Ayala, G. (2001): «Análisis no lineal de muros de mampostería confinada sujetos a cargas laterales», *Enghenaria Civil*, 11, 21-34.
- O'Reilly, G. J. y Sullivan, T. J. (2018): «Probabilistic seismic assessment and retrofit considerations for Italian RC frame buildings», *Bulletin of Earthquake Engineering*, 16(3), 1447-1485. <https://doi.org/10.1007/s10518-017-0257-9>
- Ozcelik, R., Akpinar, U. y Binici, B. (2011): Seismic Retrofit of Deficient RC Structures with Internal Steel Frames. *Advances in Structural Engineering*, 14 (6) , 1205-1222. <https://doi.org/10.1260/1369-4332.14.6.1205>
- Ozcelik, R., Binici, B. y Akpinar, U. (2013): «Seismic retrofit of non-ductile reinforced concrete frames with chevron braces», *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Structures and Buildings*, 166(7), 326-341. <https://doi.org/10.1680/stbu.12.00002>
- Ozcelik, R., Binici, B. y Kurç, O. (2012): «Pseudo Dynamic Testing of an RC Frame Retrofitted with Chevron Braces», *Journal of Earthquake Engineering*, 16, 515-539. <https://doi.org/10.1080/13632469.2011.653297>
- Pampanin, S., Christopoulos, C. y Chen, T.-H. (2006): «Development and validation of a metallic haunch seismic retrofit solution for existing under-designed RC frame buildings», *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 35(14), 1739-1766. <https://doi.org/10.1002/eqe.600>
- Papanicolaou, C. G., Triantafyllou, T. C., Karlos, K. y Papathanasiou, M. (2007): «Textile-reinforced mortar (TRM) versus FRP as strengthening material of URM walls: In-plane cyclic loading», *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 40(10), 1081-1097. <https://doi.org/10.1617/s11527-006-9207-8>
- Papanicolaou, C. G., Triantafyllou, T. C., Papathanasiou, M. y Karlos, K. (2008): «Textile reinforced mortar (TRM) versus FRP as strengthening material of URM walls: Out-of-plane cyclic loading», *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 41(1), 143-157. <https://doi.org/10.1617/s11527-007-9226-0>
- Parlamento Europeo (2002): *Directiva 2002/91/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 16 de diciembre de 2002 relativa a la eficiencia energética de los edificios*. Unión Europea. <https://www.boe.es/doue/2003/001/L00065-00071.pdf>
- Perrone, D., Aiello, M. A., Pecce, M. y Rossi, F. (2015): «Rapid visual screening for seismic evaluation of RC hospital buildings», *Structures*, 3, 57-70. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2015.03.002>
- Petrovčič, S. y Kilar, V. (2020): «Design Considerations for Retrofitting of Historic Masonry Structures with Externally Bonded FRP Systems», *International Journal of Architectural Heritage*, 1-20. <https://doi.org/10.1080/15583058.2020.1853278>
- Proença, J., Gago, A. S., Cardoso, J., Cóias, V. y Paula, R. (2012): «Development of an innovative seismic strengthening technique for traditional load-bearing masonry walls», *Bulletin of Earthquake Engineering*, 1(10), 113133. <https://doi.org/10.1007/S10518-010-9210-X>
- Proença, J. M., Gago, A. S. y Vilas Boas, A. (2019): «Structural window frame for in-plane seismic strengthening of masonry wall buildings», *International Journal of Architectural Heritage*, 13 (1), 98-113. <https://doi.org/10.1080/15583058.2018.1497234>
- Requena-García-Cruz, M. V., Morales-Esteban, A., Durand-Neyra, P. y Estevao, J. M. C. (2019): «An index-based method for evaluating seismic retrofitting techniques. Application to a reinforced concrete primary school in Huelva», *Plos One*, 14 (4), e0215120. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0215120>
- Requena-García-Cruz, M. V., Morales-Esteban, A. y Durand-Neyra, P. (2021): «Optimal ductility enhancement of RC framed buildings considering different non-invasive retrofitting techniques», *Engineering Structures*, 242, 112572. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112572>
- Rodrigues, J., Ilic, J. M. y Bento, R. (2022): «Seismic Retrofitting of Irregular Mixed Masonry-RC Buildings: Case Study in Lisbon», en *Seismic Behaviour and Design of Irregular and Complex Civil Structures IV. Geotechnical, Geological and Earthquake Engineering*, 50, 163-175. https://doi.org/10.1007/978-3-030-83221-6_14
- Romero-Sánchez, E., Morales-Esteban, A., Requena-García-Cruz, M. V., Zapico-Blanco, B. y de-Miguel-Rodríguez, J. (2020): «Specific seismic retrofitting of a compact reinforced concrete building with X-bracings and steel jackets. Application to a primary school in Huelva», *Plos One*, 15(9). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0238505>

- Saleem, M. U., Numada, M., Amin, M. N. y Meguro, K. (2016): «Seismic response of PP-band and FRP retrofitted house models under shake table testing», *Construction and Building Materials*, 111, 298-316. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.073>
- Sasmal, S. y Nath, D. (2017): «Seismic performance of non-invasive single brace made of steel and shape memory alloy for retrofit of gravity load designed sub-assemblages», *Engineering Structures*, 143, 316-329. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.04.024>
- Segovia-Verjel, M. L., Requena-García-Cruz, M. V., De-Justo-Moscardó, E. y Morales-Esteban, A. (2019): «Optimal seismic retrofitting techniques for URM school buildings located in the southwestern Iberian peninsula», *PLoS ONE*, 14(10), 1-18. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0223491>
- Seo, H., Kim, J. y Kwon, M. (2018): «Optimal seismic retrofitted RC column distribution for an existing school building», *Engineering Structures*, 168, 399-404. <https://doi.org/10.1016/J.ENGSTRUCT.2018.04.098>
- Shabdin, M., Attari, N. K. A. y Zargarán, M. (2018): «Experimental study on seismic behavior of Un-Reinforced Masonry (URM) brick walls strengthened with shotcrete», *Bulletin of Earthquake Engineering*, 16(9), 39313956. <https://doi.org/10.1007/s10518-018-0340-x>
- Simões, N., Manaia, M. y Simões, I. (2021): «Energy performance of solar and Trombe walls in Mediterranean climates», *Energy*, 234. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121197>
- Sistani Nezhad, R., Kabir, M. Z. y Banazadeh, M. (2016): «Shaking table test of fibre reinforced masonry walls under out-of-plane loading», *Construction and Building Materials*, 120, 89-103. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.05.097>
- Sorace, S. y Terenzi, G. (2008): «Seismic Protection of Frame Structures by Fluid Viscous Damped Braces», *Journal of Structural Engineering*, 134(1), 45-55. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2008\)134:1\(45\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2008)134:1(45))
- Sorace, S. y Terenzi, G. (2009): «Fluid viscous damper-based seismic retrofit strategies of steel structures: general concepts and design applications», *Advanced Steel Construction*, 5(3), 325-342. <https://doi.org/10.18057/IJASC.2009.5.3.7>
- Sorace, S. y Terenzi, G. (2012): «Dissipative Bracing-Based Seismic Retrofit of R/C School Buildings», *The Open Construction and Building Technology Journal*, 6, 334-345. <https://doi.org/10.2174/1874836801206010334>
- Stazi, F., Mastrucci, A. y Perna, C. di. (2011): *Experimental and numerical study on the performance of solar walls in Mediterranean climates*. World Renewable Energy Congress. https://ep.liu.se/ecp/057/vol8/026/ecp57vol8_026.pdf
- TahamouliRoudsari, M., Entezari, A., Hadidi, M. y Gandomian, O. (2017): «Experimental Assessment of Retrofitted RC Frames With Different Steel Braces», *Structures*, 11, 206-217. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2017.06.003>
- Truong, G. T., Dinh, N. H., Kim, J.-C. y Choi, K.-K. (2017): «Seismic Performance of Exterior RC Beam-Column Joints Retrofitted using Various Retrofit Solutions», *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 11(3), 415-433. <https://doi.org/10.1007/s40069-017-0203-x>
- Turco, V., Secondin, S., Morbin, A., Valluzzi, M. R. y Modena, C. (2006): «Flexural and shear strengthening of un-reinforced masonry with FRP bars», *Composites Science and Technology*, 66(2), 289-296. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2005.04.042>
- Valente, M. y Milani, G. (2018): Alternative retrofitting strategies to prevent the failure of an under-designed reinforced concrete frame. *Engineering Failure Analysis*, 89, 271-285. <https://doi.org/10.1016/J.ENGFAILANAL.2018.02.001>
- Vázquez Gutiérrez, J., González Tamarit, L., Torres Hidalgo, M. y Ramírez Moreno, N. (1997): *Arquitectura y Clima en Andalucía. Manual de diseño*. https://www.juntadeandalucia.es/sites/default/files/2021-05/60acb1501bb86-arquitectura_y_clima_andalucia_1997.pdf
- Young, J. W. S. (1997): A framework for the ultimate environmental index-putting atmospheric change into context with sustainability. *Environmental Monitoring and Assessment*, 46(1-2), 135-149. <https://doi.org/10.1023/A:1005700321608/METRICS>

4

Actuaciones combinadas y sistemas integrados para la mejora sísmica y energética. Metodologías de evaluación

M. Pilar López-Piña* y María-Victoria Requena-García-Cruz*

* *Departamento de Estructuras de Edificación e Ingeniería del Terreno
Universidad de Sevilla*

RESUMEN

La mejora de la sostenibilidad de los edificios requiere, además de reducir su consumo energético, incrementar su durabilidad. Para ello, en las zonas de riesgo sísmico, es fundamental mejorar su seguridad estructural frente a posibles terremotos. Las medidas necesarias para alcanzar ambos objetivos, generalmente se plantean en actuaciones separadas. Sin embargo, diversas investigaciones ponen de manifiesto la importancia de realizarlas de forma conjunta, mediante actuaciones combinadas. Esto supone una serie de beneficios de carácter económico y medioambiental. Además, previene los riesgos que conlleva implementar solo una de las actuaciones o realizarla desde un enfoque parcial.

Las actuaciones combinadas, además de incluir medidas de mejora de la eficiencia energética y la seguridad sísmica, podrán incluir medidas que resuelvan de forma simultánea ambos objetivos. Son los llamados sistemas integrados.

En los últimos años se han llevado a cabo una serie de investigaciones que analizan diferentes opciones de actuaciones combinadas aplicadas a casos concretos de estudio, también se han propuesto diversos sistemas integrados y se han planteado nuevas metodologías para la evaluación de estas intervenciones. En este trabajo se realiza una revisión de todos estos estudios y, a partir de ellos, se extraen una serie de conclusiones sobre sus beneficios y limitaciones, así como sobre los aspectos en los que deben profundizar las futuras investigaciones.

Además, en los últimos años se han propuesto una serie de sistemas que combinan de forma simultánea la mejora térmica y el refuerzo ante el sismo. Son los llamados sistemas integrados.

4.1. LA IMPORTANCIA DE LA INTERVENCIÓN COMBINADA E INTEGRADA

En capítulos anteriores se ha puesto de manifiesto que para conseguir un parque edificatorio sostenible, además de reducir su consumo energético, es necesario incrementar su durabilidad. Para ello es fundamental mejorar su seguridad estructural, especialmente frente a eventos que puedan ocasionarle daños importantes, como el caso de los sismos. De esta manera se reduciría el coste medioambiental que suponen las diferentes reparaciones, demoliciones y reconstrucciones de los edificios tras los terremotos.

Para conseguir ambos objetivos en el capítulo anterior se han expuesto diferentes estrategias y medidas de mejora que se pueden implementar. Si todas las necesarias para un mismo edificio, o una gran parte de ellas, se ejecutan en una sola intervención se lograría una gran optimización de los recursos empleados. Ya que la mano de obra sería menor, se podrían aprovechar los medios auxiliares, los trabajos previos a estas remodelaciones solo se llevarían a cabo una vez y lo mismo ocurriría con la preparación de superficies o acabados finales, por indicar algunos ejemplos. Esto supone menores costes y también menor duración en el tiempo de las obras. Además de una reducción en el impacto ambiental asociado. Sin embargo, no podemos obviar que conlleva un importante desembolso económico inicial. Las subvenciones públicas suponen una ayuda en este sentido, aunque en la mayoría de los casos están enfocadas solo a las mejoras energéticas.

Por otro lado, la combinación de medidas energéticas y sísmicas en una misma intervención supone otras ventajas adicionales a considerar. En primer lugar, se evitaría que un evento sísmico tras una remodelación de carácter únicamente energético pudiera ocasionar daños graves en el edificio. También evitaríamos que todas las medidas energéticas implementadas en él se perdieran. Esto supondría una pérdida del valor económico de la construcción, pero también una considerable pérdida en las prestaciones térmicas del mismo (Belleri y Marini, 2016). Para ello, no es necesario que el terremoto sea muy significativo, pequeños movimientos sísmicos podrían reducir la eficacia de algunas medidas, como es el caso de determinados tipos de aislamiento que podrían perder sus propiedades (Gkournelos *et al.*, 2019a).

Otro de los beneficios de las actuaciones combinadas es que permiten un diseño holístico e integrado de la rehabilitación (Artino *et al.*, 2019). Esto es especialmente relevante para evitar incompatibilidades entre los diferentes aspectos que intervienen en ella. Ejemplos de ello podrían ser un refuerzo estructural que generara puentes térmicos o una concentración de masas para mejora energética que transformara el comportamiento sísmico del edificio, ocasionando graves perjuicios en el mismo (Manfredi y Masi, 2018).

Por todo lo anteriormente expuesto, es necesario que las actuaciones para lograr la seguridad estructural y la mejora energética de los edificios se lleven a cabo de forma combinada, con un enfoque integrado y desde un punto de vista interdisciplinar. Esto supone un cambio sustancial en la manera de concebir y abordar estas reformas. Lo que requiere una serie de esfuerzos desde diversos ámbitos, entre ellos el de la investigación, que debe explorar nuevas metodologías, estrategias y sistemas para poder abordar con éxito este nuevo reto.

Una vez descritas en el capítulo anterior las diferentes estrategias y soluciones, existentes a día de hoy, que podemos combinar para alcanzar ambos objetivos, en este capítulo se reflexiona

sobre diversos criterios y metodologías para determinar la combinación de medidas que más se adecúe a cada caso. No obstante, además de las ya expuestas también se pueden llevar a cabo otras que resuelvan de forma simultánea tanto la mejora térmica como la sísmica. Son los denominados sistemas integrados. Elementos, materiales y soluciones diseñados específicamente para que junto con el refuerzo estructural se logre una reducción de la demanda energética de los edificios. Esto supone una serie de ventajas adicionales a las antes descritas, tanto en la ejecución de las obras como en la consecución de sus objetivos, que se describirán en el apartado 4.3 (página 73).

En este capítulo se lleva a cabo una revisión, a modo de estado de la cuestión, de las diferentes investigaciones que se han realizado en este campo, todas ellas efectuadas en fechas muy recientes, debido al carácter novedoso de esta materia. Se han dividido los estudios entre los que presentan actuaciones combinadas y los que plantean nuevos sistemas integrados. Si bien, esta clasificación no siempre está clara, dado que se pueden llevar a cabo actuaciones combinadas que incluyan sistemas integrados. Además, dado el carácter heterogéneo de las investigaciones resulta complejo establecer un análisis comparativo entre ellas. Estas cuestiones se irán comentando a lo largo del capítulo.

4.2. ACTUACIONES COMBINADAS DE MEJORA ENERGÉTICA Y SÍSMICA

4.2.1. Criterios para la combinación de medidas y metodologías de evaluación

Ya se han indicado los beneficios que conllevan las actuaciones combinadas (apartado 4.1, página 68) y las medidas que se pueden incluir en ellas (capítulo 3, página 41). La siguiente cuestión que se plantea es cómo se deben combinar. Teniendo en cuenta las experiencias expuestas en la bibliografía consultada, proponemos los siguientes criterios de combinación:

- *Por ámbito de actuación.* Es decir, se llevarían a cabo a la vez actuaciones que tienen lugar en cerramientos, en cubiertas, etc. Esto permite el aprovechamiento de muchos de los elementos necesarios para llevar a cabo los trabajos. También permite una optimización en la organización de los mismos, lo que supone un menor coste en la mano de obra.
- *Por alcance de la actuaciones.* Con el fin de lograr un equilibrio entre los objetivos, pues de nada serviría realizar una remodelación muy completa del edificio a nivel energético si a nivel estructural solo se llevan a cabo soluciones mínimas.
- *Por tiempo de interrupción del uso del edificio.* Para conseguir una mayor optimización en este aspecto, minimizando las molestias a sus usuarios.
- *Por nivel de costes.* Se llevarían a cabo actuaciones que presentan un coste similar, para optimizar económicamente la intervención.

No obstante, lo recomendable es tener en cuenta los cuatro criterios. La importancia de cada uno de ellos dependerá de las circunstancias y características de cada caso concreto. Por ejemplo, en edificios que requieran complejos sistemas de andamiaje el criterio de ámbito de actuación primará sobre el resto; o en el caso de edificios en zonas de alta sismicidad pero clima suave,

no tiene sentido combinar actuaciones de similar alcance, ya que las de refuerzo estructural serán más significativas que las de mejora energética.

Son varios los artículos que han reflexionado sobre esta cuestión. En Menna *et al.* (2021) propusieron un marco conceptual, en el que se indica cómo se pueden combinar diferentes medidas de mejora energética y sísmica. Para ello, establecieron tres grupos homogéneos en cada uno de los objetivos, donde incluye diferentes actuaciones con similar tiempo de ejecución, coste y alcance. De forma que cada grupo se relacionaba con el correspondiente del objetivo opuesto, creándose tres niveles diferentes de actuación. El nivel 1 englobaba actuaciones superficiales y puntuales, mientras que en el nivel 3 se encuentran las de mayor coste, alcance y tiempo de ejecución.

Además de lo anteriormente expuesto, en las actuaciones de mejora energética y sísmica se debe garantizar la compatibilidad entre las diferentes intervenciones que se lleven a cabo. Nos referimos a la compatibilidad desde el punto de vista constructivo, energético y estructural. De modo que las mejoras energéticas no afecten a la efectividad de las mejoras sísmicas y viceversa. Para ello, es necesario que, como se indicó en el apartado anterior, se conciban y desarrollen de forma integrada, partiendo de un examen exhaustivo del comportamiento energético y sísmico del propio edificio.

Por otro lado, también es importante garantizar la compatibilidad con el resto de características y singularidades del edificio. Una intervención de este tipo debe, ante todo, ser respetuosa con los posibles valores arquitectónicos, paisajísticos, sociales o culturales, entre otros, que pueda albergar el edificio. Tanto esta cuestión como la indicada en el párrafo anterior obligan a llevar a cabo las actuaciones desde un enfoque interdisciplinar, con la participación de especialistas en todos los campos implicados.

Diferentes autores han estudiado los beneficios de la aplicación de actuaciones combinadas a casos concretos de estudio. Para ello, han llevado a cabo simulaciones numéricas que muestran el comportamiento estructural y energético de los diferentes edificios antes y después de la intervención.

Para la evaluación estructural, la metodología más frecuente es la establecida en el proyecto Risk-UE y se basa en el Método del Espectro de Capacidad (Moreno González y Bairán García, 2012). Consiste en realizar un análisis estático no lineal de las estructuras obteniendo las curvas de capacidad y su simplificación bilineal. A partir de estas se definen las correspondientes curvas de fragilidad y se obtienen diversas matrices de probabilidad de daño. Otras metodologías empleadas se basan en la generación de funciones de vulnerabilidad simuladas (Maldonado Rondón *et al.*, 2008). Estas funciones relacionan un índice de vulnerabilidad con un índice de daño, según un parámetro que describe el movimiento del suelo. En otros casos se han basado en funciones de vulnerabilidad observada (Caicedo *et al.*, 1994), las cuales parten de la información existente de registros de daños debidos a sismos ocurridos anteriormente.

La simulación de los edificios para conocer su comportamiento energético se suele llevar a cabo mediante una cuantificación de su demanda energética y de su consumo energético anual. Esta se puede realizar en régimen estacionario o en régimen dinámico. Los métodos que emplean el régimen dinámico tienen en cuenta procesos transitorios asociados a condiciones variables de temperatura y humedad a lo largo del tiempo (Gavilán Casal, 2015). Por tanto, permiten obtener unos resultados mucho más precisos.

Estas metodologías de evaluación energética y sísmica han sido empleadas también en las investigaciones sobre los diferentes sistemas integrados que se exponen en el apartado 4.3 (página 73). Además, diferentes autores han evaluado la viabilidad económica y financiera de muchas de estas actuaciones. La metodología seguida para ello se expone en el apartado 4.4 (página 82). En este apartado se indican también algunos procedimientos planteados para la evaluación del impacto ambiental relacionado con estas intervenciones.

4.2.2. Tipos de combinaciones estudiadas y resultados

A continuación, se exponen brevemente los diferentes estudios consultados sobre actuaciones combinadas de mejora sísmica y energética. En ellos se estudian de forma comparada diferentes opciones de actuaciones combinadas que se analizan siguiendo los procedimientos indicados anteriormente.

En Caprino *et al.* (2021) se estudió el Palacio de Justicia de Fabriano. Un antiguo edificio de muros de fábrica compuestos de diferentes materiales (ladrillo, piedra, combinación de piedra y ladrillo) y diversos tipos de forjados construido en 1940. En él se aplican varios conjuntos de actuaciones combinadas. El primero consiste en el refuerzo de los muros con inyecciones de lechada y revestimiento de mortero de cemento reforzado aplicado a ambos lados. También se dispone aislamiento de lana de roca por el interior de los muros de fachada y se sustituyen las ventanas. El segundo conjunto consiste en el refuerzo de forjados, la instalación de diversas instalaciones de climatización y ventilación, así como la incorporación de aislamiento en las particiones horizontales. El tercer conjunto combina las actuaciones del primero con las del segundo. Finalmente, en un cuarto conjunto se incorpora a todo ello un sistema de generación de energía fotovoltaica.

Para el análisis comparado de estas actuaciones se llevó a cabo una evaluación sísmica, una evaluación energética utilizando un modelo dinámico y también una evaluación económica. Los resultados demuestran que el segundo conjunto es el más rentable de todos. Sin embargo, el tercer conjunto supone, como era de esperar, mayor mejora sísmica y energética, pero con mayor coste, aunque la cantidad resultante es menor que la suma de los dos primeros. De esta forma se verifica que actuaciones más ambiciosas, al llevarse a cabo de forma conjunta, no suponen un excesivo incremento económico. Además, este edificio se estudió para otras zonas sísmicas y climáticas de Italia. Se obtuvo que en las zonas con riesgo sísmico bajo o medio la intervención combinada sigue siendo rentable, pero no ocurre lo mismo en las zonas con muy bajo riesgo sísmico. También se observó que la rentabilidad de las actuaciones disminuye considerablemente en las zonas más cálidas, aunque si presentan un riesgo sísmico considerable, siguen siendo viables.

En Menna *et al.* (2021), el marco conceptual propuesto de clasificación de actuaciones también se aplica a dos casos de estudio concretos. Se trata de un edificio docente y un edificio residencial, ambos construidos en las décadas de 1960 y 1970 en Italia, con estructura de hormigón armado. Se plantean tres actuaciones combinadas diferentes, una por cada nivel del marco conceptual. Así, la correspondiente al nivel 1 consiste en diferentes refuerzos con CFRP en determinadas uniones y pilares cortos de ambos edificios. Además, se incorpora aislamiento en la

cubierta, se sustituye la carpintería de ventanas y se instalan válvulas de regulación en el sistema de calefacción. La del nivel 2 incluye las medidas del nivel 1 pero los refuerzos estructurales de las uniones vigas-pilar son más significativos, se incorpora aislamiento en las cámaras de los cerramientos y se instalan equipos nuevos de calefacción más eficientes. Finalmente, la del nivel 3 consiste en una rehabilitación completa del edificio tanto a nivel energético como sísmico, que incluye tecnología LED y paneles fotovoltaicos.

El cálculo del comportamiento energético se realiza a partir de un modelo dinámico, y el sísmico a partir de un análisis estático no lineal. Tras estas simulaciones se obtiene una mejora significativa del comportamiento sísmico de ambos edificios en todos los niveles de actuaciones, mejorando la clase de riesgo sísmico a la que pertenecen según la normativa italiana. Los resultados energéticos también arrojan una reducción importante del consumo energético. Este oscila entre un 20 % en el caso de las actuaciones de nivel 1 y un 60 % aproximadamente en las del nivel 3. Así pues, se obtuvo una mejora gradual en los objetivos propuestos en relación con el alcance de las actuaciones planteadas. De forma que se demostró la utilidad de dicho marco conceptual.

En Caruso *et al.* (2021), sus autores propusieron una metodología nueva que introduce las pérdidas causadas por el sismo en los análisis de ciclos de vida. No obstante, como parte de la investigación, estudiaron la aplicación de diferentes actuaciones combinadas a edificios concretos. La metodología de estudio es análoga a la empleada en las publicaciones anteriores, aunque no se detienen en evaluar el comportamiento sísmico o energético, puesto que su objetivo es obtener resultados sobre emisiones de dióxido de carbono y costes en términos de ciclo de vida. Por esta razón, a diferencia de los estudios anteriores, el cálculo del comportamiento energético del edificio se realiza en régimen estacionario. El caso de estudio es un colegio con estructura de hormigón armado construido entre 1960 y 1970 en Isola del Gran Sasso, un municipio del centro de Italia. Se compararon hasta ocho opciones de actuaciones: dos de mejora sísmica que consistieron en el refuerzo de las uniones viga-pilar y la construcción de nuevos muros pantalla; otras dos de carácter energético basadas en la incorporación de aislamiento térmico en la envolvente, y finalmente cuatro actuaciones en las que se combinaron entre sí las medidas anteriores. Sobre los resultados obtenidos, se concluye que ni los refuerzos de las uniones, ni la incorporación de nuevos muros pantalla supusieron una mejora significativa en términos de costes de ciclo de vida o de impacto ambiental. Los mejores resultados se obtuvieron con las actuaciones de aplicación de aislamiento, especialmente cuando se combina con la construcción de nuevos muros pantalla. Además, se pudo observar que las opciones de actuaciones combinadas son las que mejores resultados arrojaron en una perspectiva a largo plazo.

Un estudio diferente a los anteriores, pero bastante esclarecedor sobre los beneficios de las actividades combinadas es el de Pohoryles *et al.* (2020). En este caso el objeto de estudio ya no es un edificio sino el parque inmobiliario de veinte ciudades europeas, de diferentes zonas climáticas y sísmicas. Entre otras cuestiones, se estudiaron los beneficios que supone una actuación combinada de revestimiento exterior con refuerzo estructural y aislamiento (este sistema se detalla en el apartado siguiente) junto con la sustitución de ventanas. Para ello, la compararon con otras intervenciones donde solo se llevó a cabo una mejora energética o una mejora sísmica. Se pudo observar cómo en las zonas donde es necesario el refuerzo ante el sismo, la actuación combinada supone significativos beneficios a nivel económico, especialmente una importante reducción en el período de amortización.

Estos estudios demuestran los beneficios de las intervenciones combinadas, sobre todo en términos económicos. Sin embargo, al tratarse de estudios más enfocados a la obtención de resultados sobre la sostenibilidad o la rentabilidad económica, no profundizan demasiado en la mejora del comportamiento energético y sísmico. Además, debido a su escaso número y la heterogeneidad de los casos que se analizan y las actuaciones que se proponen, no es posible extrapolar estos resultados a otros casos diferentes.

4.3. LOS SISTEMAS INTEGRADOS

4.3.1. Los beneficios de los sistemas integrados

Como ya se ha indicado en el apartado 4.1 (página 68), con el concepto de sistemas integrados nos referimos a aquellas soluciones, materiales y elementos, o conjuntos de ellos, específicamente diseñados para mejorar de forma simultánea tanto la eficiencia energética como el comportamiento sísmico de los edificios. De esta manera, la combinación de medidas no se produce en el proyecto de rehabilitación, sino en una fase anterior: la del diseño del propio sistema. Además, en ellos, las mejoras no se conjugan de forma aditiva, sino de forma integrada. Es decir, ofreciendo una respuesta global a ambos objetivos desde el momento de su concepción. La implementación de estos sistemas presenta tres ventajas fundamentales:

- *La optimización de los recursos y de la organización de los trabajos.* Se puede llegar a conseguir una optimización aún mayor que con las actuaciones combinadas, dado que la simultaneidad de objetivos se alcanza ya con el propio sistema.
- *La simplificación en la ejecución.* Al tratarse de soluciones diseñadas y estudiadas para que se comporten como un conjunto, se reducen los requerimientos constructivos en su puesta en obra.
- *La compatibilidad entre las diferentes soluciones que intervienen en el sistema.* Especialmente si se trata de sistemas que han sido ensayados y testados con anterioridad.

4.3.2. Tipos de sistemas y resultados

Actualmente, los tipos de sistemas integrados planteados son escasos y se encuentran en una fase incipiente de la verificación de sus prestaciones. Además, las investigaciones llevadas a cabo sobre ellos son en su mayoría de los últimos cinco años. Esto denota la novedad de este campo de estudio y también la necesidad de seguir investigando y proponiendo nuevos sistemas, sobre todo, debido a las ventajas que presentan.

Como se ha observado en el capítulo anterior, las medidas de mejora energética con las que se alcanza una mayor reducción del consumo energético se aplican por el exterior de la envolvente. Además, muchas de las técnicas de refuerzo sísmico están indicadas para ejecutarse de esta manera. Por ello, los sistemas planteados en la bibliografía consultada consisten en actuaciones que afectan a «la piel» de los edificios. Con ello, también se busca ocasionar las mínimas molestias posibles a los usuarios de los edificios.

Los sistemas investigados en los diferentes artículos consultados podemos clasificarlos, según la manera en que interactúan con el edificio existente, en tres grandes grupos: los que consisten en la instalación de una nueva estructura exterior anclada a la existente (exoesqueletos), los que proponen la sustitución de la hoja exterior de los cerramientos por otra con mejores prestaciones y los que suponen la aplicación de un nuevo revestimiento en el que se combina el refuerzo estructural con un material aislante.

Tras la revisión bibliográfica, se ha elaborado una tabla resumen (tabla 4.1) donde se indican los diferentes sistemas planteados en las investigaciones consultadas y otros fácilmente deducibles a partir de ellas.

Tabla 4.1. Clasificación de los sistemas integrados propuestos en la bibliografía consultada y otros deducidos a partir de ella. Elaboración propia

Sistemas integrados de mejora energética y sísmica				
Exoesqueleto <i>Para edificios de estructura de hormigón armado y metálica</i>	Según su comportamiento estructural	Contrafuertes	Con dispositivos disipativos	
			Sin dispositivos disipativos	
		Caja rígida	Con dispositivos disipativos	
			Sin dispositivos disipativos	
	Elementos de refuerzo adicional en fachada			
	Según su comportamiento energético	Nueva envolvente		
		Mejora de la envolvente existente		
		Con incorporación de estrategias de ganancia solar: invernaderos adosados y muro Trombe		
		Solo elementos de protección solar		
	Según aspectos funcionales	Supone ampliación del espacio útil del edificio		
No supone ampliación				
Sustitución de la hoja exterior del cerramiento <i>Para edificios con estructura de hormigón o metálica y cerramientos de fábrica de doble hoja</i>	Hoja. Sustitución por otra con mejores prestaciones: de fábrica de ladrillo, de bloques, etc. Ejemplo ensayado: bloques de hormigón aireados en autoclave	Con aislamiento adicional	Por el exterior	
			En la cámara	
	Sin aislamiento adicional			
Revestimiento con refuerzo estructural y aislamiento <i>Para edificios con estructura de muros de carga de fábrica o con estructura de hormigón y cerramientos de fábrica</i>	TRM y paneles de aislamiento (EPS, XPS, MW, etc.)			
	Mortero de cal aislante con GFRP			
	Mortero a base de escoria activada por álcalis. Posibilidad de refuerzo con GFRP			
	Mortero de cemento reforzado con malla de acero y paneles de aislamiento			
	Sistema compuesto por panel OSB y diferentes tipos de aislamiento. Sistema DUO			

Exoesqueletos

Los sistemas de exoesqueletos autoportantes anclados a la estructura existente de los edificios se han empleado en proyectos de regeneración urbana para mejorar las condiciones formales, funcionales y energéticas de los edificios. En los últimos años se ha comenzado a estudiar las posibilidades que ofrecen para la mejora estructural frente al sismo, lo que posibilita la creación de sistemas que permitan una mejora integrada de ambos aspectos.

Así pues, Takeuchi *et al.* (2009) propusieron un sistema de exoesqueleto constituido por dispositivos de disipación de energía en caso de sismo junto con elementos de control solar y/o paneles de vidrio, a modo de doble piel, configurando una cámara de aire ventilada. Con ello, proponían un concepto de «fachada integrada» que trata el diseño estructural, el formal y el ambiental de manera combinada en una única solución. Este sistema fue instalado en el edificio Midorigaoka-1 del Instituto de Tecnología de Tokio, de seis plantas de altura y construido en 1966. La configuración adoptaba establecía diagonales BRB recubiertas por lamas horizontales en los vanos y paneles de vidrio en las zonas opacas. Una solución estudiada para las condiciones climáticas de Japón. Para verificar la respuesta en caso de sismo de los dispositivos diseñados, los autores realizaron una maqueta de una parte del edificio existente a gran escala que se ensayó en laboratorio, arrojando unos resultados bastante satisfactorios.

Con este tipo de actuación, desarrollada por el exterior del edificio, también se pretendía que las obras causaran las mínimas molestias posibles a los ocupantes. En este caso, los autores (Takeuchi *et al.*, 2009) pudieron constatar cómo en la fase más ruidosa algunas facultades tuvieron que trasladarse temporalmente a otras instalaciones. Sin embargo, el edificio contó con una ocupación en torno al 60 % durante todo el trascurso de las obras.

Sus autores indican que este sistema permite su desarrollo en otras muchas configuraciones. Algunas muy sencillas, como el caso de dispositivos diagonales de refuerzo sísmico que constituyen por sí solos un sistema de control solar en los huecos de fachada. Sistema que se instaló en el edificio administrativo Instituto de Tecnología de Tokio.

Una visión general de las soluciones estructurales y energéticas que pueden abordarse desde el diseño del exoesqueleto se describe en Marini *et al.* (2017). En él se propuso una clasificación que los divide, según su comportamiento estructural, en dos grandes grupos (figura 4.1): los compuestos por elementos que a modo de contrafuertes se disponen perpendicularmente a las fachadas y los que configuran una nueva envolvente alrededor del edificio, trabajando como caja rígida. Ambos grupos se pueden dividir a su vez en otros dos subgrupos, dependiendo de si incluyen dispositivos disipativos de energía o no. Esta clasificación es la que se ha incluido en la tabla 4.1 para agrupar los exoesqueletos según su comportamiento estructural, con la salvedad de que se ha añadido un nuevo grupo referido a aquellos que no buscan mejorar el comportamiento global del edificio sino simplemente el de las fachadas concretas donde se instalan, a modo de refuerzo adicional.

Según Marini *et al.* (2017) los exoesqueletos que trabajan como contrafuertes rigidizando el edificio, pueden llegar a requerir elementos de resistencias significativas, por lo que requieren cimientos nuevos. En ellos, la mejora en la eficiencia energética la proporciona la nueva fachada que se dispone paralela a la existente. Para casos en los que se requiere una mayor rigidez se debe emplear el sistema de «caja rígida», con el que se obtienen secciones más pequeñas y la carga en

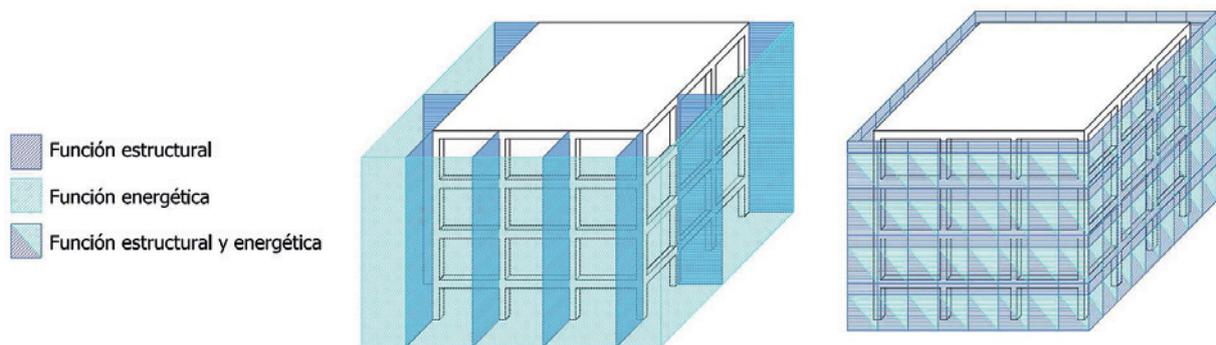


Figura 4.1. Sistema exoesqueleto de contrafuertes (izquierda) y sistema exoesqueleto de caja rígida (derecha).
Elaboración propia basada en la figura 5 de Marini *et al.* (2017)

cimentación es menor. En este caso la estructura con la que se consigue la mejora sísmica sirve de soporte para la nueva envolvente térmica del edificio, incluso los propios elementos aislantes podrían también contribuir a mejorar la resistencia sísmica en el plano. Además, tanto el sistema de caja rígida como el de contrafuertes podrían albergar dispositivos disipativos de energía que mitiguen las grandes deformaciones en zonas de alta demanda sísmica.

También en Marini *et al.* (2017) sus autores plantearon una solución concreta de exoesqueleto para reforzar estructuralmente un edificio residencial de tres plantas y sótano, con estructura de hormigón armado, situado en Brescia, Italia. Una zona con inviernos muy fríos y veranos templados. La solución planteada está formada estructuralmente por elementos metálicos, a modo de contrafuertes dispuestos contra las fachadas existentes. Por el exterior de estos se propone una nueva envolvente que incluye zonas con invernaderos en las fachadas sur y paneles aislantes en el resto. También se incluyen elementos de control solar y se sustituye la carpintería de los huecos. Para evaluar el comportamiento de este sistema se realizó un modelo de elementos finitos y se analizaron sus prestaciones térmicas tanto en régimen estacionario como dinámico. Los resultados en relación a su comportamiento sísmico mostraron una mejora significativa. La resistencia y la ductilidad se incrementaron. Además, se observó una distribución más uniforme de la deriva entre las plantas, junto con valores más pequeños de rotación de los diferentes elementos que conforman la estructura. Sobre los resultados de carácter energético, se aprecia una gran reducción en el consumo de calefacción (un 70 %) y una importante ganancia solar.

Otra investigación relevante sobre los sistemas de exoesqueletos en la rehabilitación integrada es el proyecto europeo Pro-Get-onE (Ferrante *et al.*, 2018). En él se propuso un sistema innovador formado por la integración de diferentes tecnologías con el que conseguir una mejora óptima de los aspectos estructurales, energéticos y funcionales de edificios existentes. Se trata de un sistema modular compuesto por elementos prefabricados que se puede personalizar para adaptarlo a diferentes casos. En este estudio se han realizado varias propuestas de diseño estructural y una serie de posibles soluciones formales, en base a diferentes hipótesis arquitectónicas. En todas ellas se consigue un aumento de la superficie útil de los edificios. A modo general, esta estructura exoesqueleto está compuesta por elementos transversales a modo de contrafuertes y otros que los conectan entre sí en la dirección longitudinal, configurando un sistema espacial. En el artículo se detallan los diferentes análisis de simulación llevados a cabo, tanto de carácter estructural como energético. Estos se realizaron sobre edificios con estructura de

hormigón armado y para diferentes zonas climáticas europeas. Los resultados estructurales obtenidos ofrecieron muy buenos resultados en cuanto a desplazamientos horizontales (16-17 % de mejora). Se verificó además que este sistema podría brindar mejoras incluso para edificios que ya han sido diseñados con un comportamiento adecuado para cargas horizontales. En cuanto al comportamiento energético, se simularon diversos diseños con diferentes soluciones térmicas (desde sistemas convencionales de aislamiento a estrategias de ganancia solar), según el escenario climático del que se tratara. Los resultados demostraron su gran efectividad, llegándose a obtener demandas de energía casi nula. Por otro lado, se evaluó la viabilidad económica del sistema, obteniéndose una reducción del 16,5 % de los costes en comparación con una actuación en la que se empleen sistemas convencionales no integrados.

Así pues, los sistemas de exoesqueletos suponen una solución de integración holística con la que se pueden lograr mejoras considerables en el comportamiento sísmico y energético de los edificios existentes. Las investigaciones consultadas han ensayado su aplicación en edificios con estructura de hormigón armado, aunque también es factible su implementación en estructuras metálicas.

En los párrafos anteriores se han expuesto diferentes tipos de diseños, desde dispositivos de refuerzo que a su vez suponen protección solar en los huecos, a potentes sistemas capaces de rigidizar todo el edificio, dotándolo de una nueva envolvente térmica y mejorando sus condiciones funcionales. En la tabla 4.1 (página 74) se ha propuesto una clasificación de las posibilidades que ofrecen desde el punto de vista estructural, energético y funcional.

El sistema de exoesqueletos permite albergar soluciones secas, estandarizadas y prefabricadas en taller que se conectan principalmente desde el exterior de los edificios. Por lo que reduce significativamente las molestias a sus ocupantes. Además, estos aspectos le confieren una gran facilidad de mantenimiento y reparación, junto con la posibilidad de ser desmontado e incluso reciclado, una vez finalice su vida útil. Por todo ello, es significativo su nivel de reversibilidad y de sostenibilidad, aunque dependerá de las características concretas de cada caso.

Su conexión con los edificios existentes es uno de los aspectos más delicados de estos diseños. Estas uniones requieren un estudio en profundidad desde el punto de vista constructivo, estructural y energético para cada caso concreto. En la mayoría de los edificios podrían suponer puentes térmicos, por lo que requieren un análisis detallado para lograr soluciones geométricas y matéricas que las minimicen.

Como ya se ha comentado, este sistema supone un aumento de las dimensiones globales del edificio, algo que no siempre es posible debido a los diversos condicionantes urbanos. Por otro lado, cabe indicar que esta intervención transforma la apariencia externa de las construcciones. Esto, en determinados casos, puede suponer una gran oportunidad para mejorar su imagen arquitectónica y urbana. Pero en otros puede afectarles negativamente, especialmente cuando se trate de edificios patrimoniales.

Sustitución de la hoja exterior de cerramientos

Otro de los sistemas integrados que se han propuesto es la sustitución de la hoja exterior de los cerramientos de fachada de ladrillo común, por un nuevo elemento con mejores prestaciones térmicas que también suponga una mejora de las propiedades mecánicas del cerramiento. Este

sistema está orientado al refuerzo de los edificios con estructura de hormigón cuyos cerramientos no posean misión estructural.

Los cerramientos, junto con las particiones interiores, aportan rigidez a las estructuras, modificando el comportamiento de los edificios frente a acciones sísmicas. Por ello, mejorando sus propiedades mecánicas aumenta la seguridad del edificio frente al sismo. No obstante, esto requiere que las hojas de los cerramientos se conecten adecuadamente a la estructura portante.

La sustitución de la hoja externa de los cerramientos permite también la incorporación de aislamiento térmico, tanto por el exterior como en la cámara. Ello contribuye a incrementar aún más la resistencia térmica de la envolvente y, en el caso del aislamiento exterior, a la reducción de los puentes térmicos.

En Artino *et al.* (2019) propusieron un sistema de este tipo, sustituyendo la hoja existente por una formada por bloques de hormigón celular en autoclave de alto rendimiento (AAC). Este material presenta una mayor resistencia mecánica y una conductividad térmica más baja que la del ladrillo cerámico convencional. Además, posee una alta resistencia al fuego. En el estudio se analiza la aplicación este sistema a un edificio residencial de Catania (Sicilia), representativo del parque edificatorio italiano construido entre 1950 y 1980. En él se sustituye la hoja exterior de los cerramientos existentes de fábrica de ladrillo por otra de bloques AAC de un formato comercial de 20 cm de espesor. Además, se propuso un aislamiento exterior de fibra de madera. Junto con esta intervención se llevó a cabo la sustitución de la carpintería de ventanas. Para la evaluación del comportamiento sísmico se utilizó el método de análisis estático no lineal. El comportamiento energético se evaluó mediante simulaciones dinámicas de energía. Los resultados arrojaron una reducción de la demanda de energía de calefacción y de refrigeración del 38% y 27%, respectivamente. En relación al comportamiento sísmico, se observó que el sistema propuesto supone un aumento de la rigidez de la estructura, proporcionando una mejora significativa en caso de sismo. Sin embargo, no es suficiente para zonas de alta sismicidad.

Sistemas análogos a este empleando otro tipo de materiales para la configuración de la hoja exterior podrían proponerse en un futuro. La diversidad de materiales y técnicas existentes en el mercado invitan a estudiar diversos planteamientos posibles.

Este sistema, al igual que ocurre con los exoesqueletos, permite intervenir fundamentalmente desde el exterior, reduciendo las molestias a sus usuarios. Sin embargo, al quedar los edificios desprovistos de la hoja externa (la que suele ser más masiva) durante la ejecución de las obras, la incidencia en el confort será mayor. Además, si la hoja nueva también es de fábrica, la duración de las obras será superior.

También cabe señalar que este sistema transforma la imagen exterior de los edificios, al igual que ocurre con los exoesqueletos. Pero, a diferencia de estos, requiere la demolición de una parte de la construcción existente. Por tanto, la transformación se realiza de manera irreversible, con los inconvenientes que ello conlleva.

Revestimientos con refuerzo estructural y aislamiento

La aplicación sobre las fachadas de los edificios de revestimientos en los que se combina una solución de refuerzo estructural con una de aislamiento térmico es otro de los sistemas integrados propuestos. Por sus características, se trata de sistemas indicados fundamentalmente para

el caso de muros de fábrica de ladrillo o piedra, pero también pueden ser aplicados sobre los cerramientos de fábrica de los edificios con estructura de hormigón o metálica.

En Triantafyllou *et al.* (2017) propusieron un sistema novedoso basado en la combinación de morteros reforzados con aislamiento térmico, dispuesto por el exterior de las fachadas de los edificios. Plantearon su aplicación en muros de carga de ladrillo sometidos a cargas cíclicas de flexión fuera del plano. En este caso, se utilizó el mortero TRM (figura 4.2). Se llevaron a cabo una serie de ensayos experimentales en laboratorio para analizar tanto su comportamiento mecánico como su resistencia frente al fuego. A partir de los resultados obtenidos, los autores obtuvieron que, a nivel de resistencia y deformación, el sistema propuesto supone un mejor comportamiento del cerramiento que si solo se aplicara el TRM. Sin embargo, no se llevó a cabo ningún tipo de estudio sobre el comportamiento energético del sistema.

Posteriormente, en Triantafyllou *et al.* (2018) realizaron otro estudio experimental para comprobar el comportamiento de este mismo sistema en muros sometidos a cargas cíclicas en el plano. Se ensayaron en laboratorio probetas tipo «muro», tipo «pilar» y tipo «viga» de fábrica de ladrillo. El sistema se probó para varias posiciones del TRM en relación con el material aislante. El estudio demostró la eficacia del sistema para este tipo de cargas. Además, se observó que el posicionamiento exacto del TRM no es relevante desde el punto de vista sísmico, siempre que se consiga una correcta unión entre los diferentes elementos. En este caso tampoco se estudiaron sus prestaciones desde el punto de vista energético.

En Bournas (2018) se estudió la aplicación de este sistema a un edificio de estructura de hormigón armado con cerramientos de fábrica de ladrillo, de cinco plantas, con planta baja libre (sobre «pilotis»), construido en la década de 1960 en Grecia. Este tipo de edificio de mediana altura y planta baja libre presenta una gran vulnerabilidad sísmica, debido al cambio brusco de rigidez que se produce en planta baja por la ausencia de tabiques y cerramientos, lo que implica mayores esfuerzos en los pilares de esta planta. La simulación sísmica se realizó con el *software* de código abierto OpenSEEs. Para calcular el consumo energético se empleó un método simplificado de la norma europea EN ISO 13790, utilizando valores de transmitancia térmica obtenidos a partir de bases de datos según la tradición constructiva del lugar. Sin embargo, el estudio no se detuvo en los resultados sobre el comportamiento estructural y energético, dado que estos son simplemente un medio para alcanzar su principal objetivo: evaluar la viabilidad financiera de este tipo de intervención. Para ello, empleó el cálculo de pérdida anual esperada, que se expondrá en el apartado 4.4 (página 82). Con él se demostró la gran rentabilidad económica que se

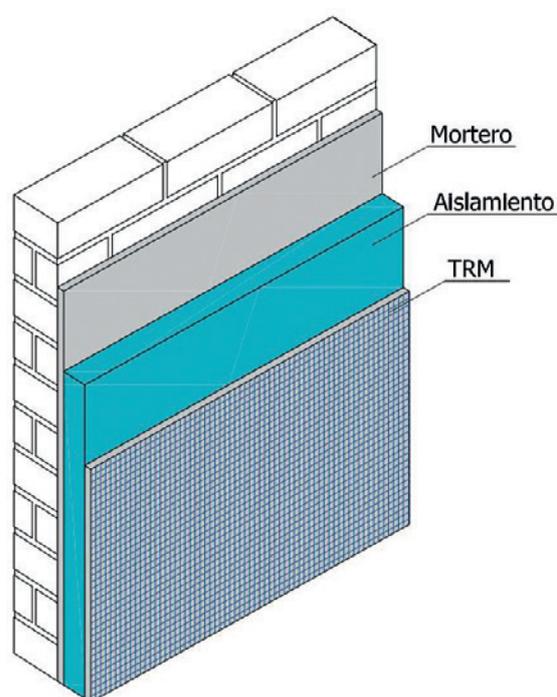


Figura 4.2. Sistema integrado formado por TRM y aislamiento térmico. Elaboración propia basada en la figura 1 de Triantafyllou *et al.* (2018)

obtiene debido a la aplicación de este sistema integrado, lográndose una reducción significativa de los tiempos de amortización (de 50 a 10 años) en comparación con actuaciones en las que únicamente se realice una mejora estructural.

Posteriormente, Gkournelos *et al.* (2019a, 2019b) llevaron a cabo un trabajo análogo al anterior aplicado a otros casos. Así pues, se estudió de forma comparada la aplicación de este sistema a tres tipos de edificios residenciales: edificio de dos plantas, de cinco plantas y de cinco plantas con planta baja libre (sobre «pilotis»). La planta y el resto de características eran iguales en los tres casos. Estos edificios se simularon en cuatro ubicaciones diferentes de Italia (con diferente clima y riesgo sísmico). El sistema de TRM y aislamiento se aplicó tanto en el exterior como en el interior de estos edificios, dependiendo de las necesidades de refuerzo sísmico que requiriera cada uno de los casos. Esta actuación se combinó con la sustitución de ventanas por otras más eficientes. La metodología empleada es similar a la del estudio anterior. En el artículo se detallan pormenorizadamente todos los datos, métodos y modelos seguidos para evaluar el comportamiento sísmico y energético de estos edificios, así como los diferentes valores obtenidos antes y después de la intervención. Se obtuvo que la actuación integrada aplicada en este caso es, al menos, un 25 % más barata que si se hubiera llevado a cabo por separado el refuerzo sísmico y la mejora energética. Además, demuestra la gran rentabilidad de este sistema, mayor cuanto más alto sea el edificio y más riesgo sísmico presente su ubicación. Así pues, en zonas con un riesgo sísmico elevado ($PGA > 0,10 g$), este tipo de actuaciones requieren de un tiempo de amortización menor incluso que si solo se llevara a cabo una de las mejoras.

En Mastroberti *et al.* (2018) propusieron una metodología para estudiar la viabilidad económica de las actuaciones combinadas y los sistemas integrados. Se aplicó para el caso del sistema integrado de TRM con aislamiento térmico en conjunción con varios tipos de actuaciones combinadas. Además, el TRM se probó con diferentes tipos de aislamiento. Los resultados demostraron, una vez más, su alta rentabilidad, especialmente en el caso de las regiones de mayor riesgo sísmico. Finalmente, Pohoryles *et al.* (2020) demostraron la viabilidad económica del sistema a nivel de parque inmobiliario en diferentes ciudades europeas.

Por tanto, según todos estos estudios, el sistema integrado compuesto por TRM y material aislante ofrece resultados bastante prometedores para la mejora combinada de las fábricas de ladrillo (tanto si se trata de muros de carga como de cerramientos). Además, se trata de un tipo de intervención poco invasiva que incluso puede llegar a ser reversible. Sin embargo, el carácter novedoso del TRM supone que su uso se encuentre aún poco extendido y su disponibilidad sea limitada. Por otro lado, su composición cementosa lo convierte en un sistema incompatible con los materiales de las antiguas fábricas, no apto para actuaciones en edificios históricos.

Para poder ofrecer una alternativa aplicable en estos casos, diversos autores han iniciado una línea de investigación que propone nuevos sistemas con morteros sin contenido en cemento. Uno de ellos es el planteado por Borri *et al.* (2016) que consiste en el uso de rejillas (GFRP) insertadas en morteros aislantes térmicos a base de cal. Los morteros aislantes térmicos contienen aditivos a base de fibras de poliuretanos o lanas minerales que les confieren una baja conductividad térmica. Por otro lado, la cal, además de ser un material altamente compatible con las construcciones históricas, presenta mejores propiedades aislantes que el cemento. Borri *et al.* (2016) analizaron experimentalmente cuatro tipos de morteros con diferentes resistencias, todos con el mismo tipo de malla GFRP y aplicados sobre hojas de fábrica de ladrillo construidas

para este fin. Con el objetivo de evaluar su comportamiento sísmico ante acciones en el plano se realizó un ensayo de tensión diagonal. Los resultados indicaron que este sistema puede aumentar considerablemente la capacidad de carga lateral de las fábricas, aunque para ello es necesario que el mortero aislante cuente con altas prestaciones mecánicas. De esta manera, se demostró la viabilidad estructural del sistema aunque su efectividad es menor que la ofrecida por los refuerzos con resinas epoxi o con revestimientos de hormigón con malla de acero. También se analizó experimentalmente su comportamiento energético. Para ello, se midieron las conductividades térmicas usando el método de medidor de flujo térmico con un equipo experimental. Se obtuvo que con una capa de recubrimiento de 45 mm, la transmitancia térmica se reducía en torno a un 34-45 %, demostrándose así su viabilidad para reducir la demanda energética en edificios existentes.

La aplicación de un mortero innovador a base de escoria activada por álcali es otro de los sistemas que se han planteado. Fue propuesto por Coppola *et al.* (2019) para mejorar las prestaciones estructurales y térmicas de los muros de fábrica de baja calidad, compuestos por elementos de piedra y/o diferentes tipos de rellenos. En este estudio se ensayaron experimentalmente varios morteros hasta obtener la proporción de mezcla que proporcionaba los requisitos deseados de resistencia y masa específica. Además se evaluó su compatibilidad con la malla GFRP. Finalmente se comprobó mediante simulación numérica sus prestaciones energéticas en un caso de estudio concreto. Las conclusiones de este estudio demuestran las características físico-químicas del material propuesto. Sin embargo, es necesario llevar a cabo más análisis que comprueben su comportamiento en construcciones existentes.

Un caso ya comercializado de sistema integrado es el creado por la empresa DUO System (Duo System) y analizado en Formisano y Vaiano (2021). Se trata de una solución compuesta por una estructura en retícula de perfiles de aluminio anclada al muro existente mediante anclajes mecánicos, sobre la que se disponen paneles OSB y, finalmente, se reviste con un acabado exterior. Entre el muro existente y los paneles OSB se insertan diferentes capas de aislamiento térmico cuya configuración variará en función de las necesidades del proyecto. Según sus autores, se puede aplicar tanto a estructuras de muros de carga como de hormigón armado. Los paneles OSB aportan a este sistema una baja conductividad térmica y un buen comportamiento frente a las acciones sísmicas. Además, a diferencia de los sistemas anteriores, su instalación es completamente en seco, confiriéndole un mayor nivel de reversibilidad. En Formisano y Vaiano (2021) este sistema se aplicó a un estudio de caso concreto. Se trata de un antiguo edificio de piedra en el que se plantean una serie de reparaciones en su estructura y la aplicación de este sistema en todas sus fachadas. Se analizó su comportamiento sísmico antes y después de la reforma mediante simulación numérica en programa de elementos finitos. El estudio arrojó unos resultados bastante satisfactorios sobre la mejora estructural. Sin embargo, no se llevó a cabo ningún tipo de análisis sobre sus prestaciones energéticas ni sobre la mejora térmica que supuso para el caso de estudio.

En este capítulo se han expuesto diferentes sistemas integrados que se encuentran, en su mayoría, en fase de investigación. En el caso de la combinación de TRM con aislamiento existe un considerable número de investigaciones, pero aún es necesario conocer más sobre su comportamiento energético aplicado a otras tipologías edificatorias y en diferentes condiciones climáticas. En el resto de técnicas la necesidad de profundizar en su conocimiento es aún mayor, ya que los datos de los que se dispone son todavía muy escasos.

Estos sistemas de revestimientos no precisan para su aplicación de ningún tipo de demolición. Son los sistemas menos invasivos de todos los expuestos en este capítulo. Ofrecen resultados viables tanto en su comportamiento sísmico como en relación al ahorro de la demanda energética. Además, algunas de las soluciones propuestas presentan una gran rentabilidad económica. A ello hay que añadir la posibilidad de lograr actuaciones reversibles y el hecho de que se estén ensayando soluciones no cementosas que pueden ser compatibles con las fábricas históricas.

El empleo de materiales innovadores es una constante en todos estos sistemas, lo que sin duda es muy beneficioso para avanzar en su conocimiento y, posterior desarrollo tecnológico. Además, implica un aumento de las posibilidades de actuación en el ámbito de la rehabilitación. Sin embargo, precisamente por su carácter novedoso, su uso aún no se encuentra muy extendido. Como ya se ha comentado para el caso del TRM, esto dificulta la posibilidad de poder acceder a ellos. Por este motivo, consideramos que se deben proponer otros sistemas análogos con materiales y técnicas más convencionales.

En este proyecto se ha propuesto el sistema de revestimiento exterior formado por mortero de cemento reforzado con una malla de acero galvanizado y combinado con paneles de aislamiento térmico, tal y como se indica más adelante en el capítulo 9. Este tipo de refuerzo de muros es una técnica de fácil aplicación y su empleo se encuentra bastante extendido. Permite mejorar el comportamiento sísmico de los muros para cargas tanto dentro como fuera del plano (Morales Esteban *et al.*, 2020). Se complementará con perfiles de acero alrededor de los huecos. Los paneles de aislamiento (EPS, XPS, MW) dispuestos por el exterior también son de uso bastante habitual y sus propiedades térmicas han sido ampliamente demostradas. La integración de estas técnicas se estudiará en capítulos posteriores. Además, se evaluará las prestaciones que ofrece al aplicarse en un caso concreto de estudio.

4.4. METODOLOGÍAS DE EVALUACIÓN Y COMPARACIÓN DE LAS DIFERENTES ESTRATEGIAS Y SISTEMAS

4.4.1. Evaluación económica y financiera

Como ya se ha observado a lo largo del capítulo, para la toma de decisiones sobre las intervenciones, además de conocer las prestaciones que ofrecen desde el punto de vista estructural y energético, es fundamental contar con datos sobre su viabilidad económica. En muchas ocasiones, esta cuestión se convierte en un factor determinante en la elección. Por otro lado, posibilita, en relación con otros parámetros, abordar su estudio desde el punto de vista social.

La mayoría de las investigaciones citadas anteriormente han realizado algún tipo de análisis económico y/o financiero para evaluar la viabilidad de sus propuestas. Para que la evaluación aporte datos útiles deberá tener en cuenta el coste de las diferentes actuaciones, el ahorro que suponen en el consumo energético y el ahorro en las reparaciones de daños tras los posibles terremotos, estas dos últimas cuestiones, en relación al valor del edificio.

Para conocer el ahorro en las reparaciones por sismos en relación con el valor del edificio, los diferentes estudios se basan en el denominado índice EAL_s . Este indicador proporciona el valor promedio de pérdida de valor que sufrirá un edificio durante el resto de su vida útil debido

a la acción sísmica (Bournas, 2018). También se puede definir como el coste de reparación de los daños causados por todos los terremotos que puedan ocurrir en la vida útil del edificio, dividido por el número de años y expresado como un porcentaje sobre el valor total del edificio (Caprino *et al.*, 2021). Según Calvi *et al.* (2016), es el más adecuado para el análisis coste-beneficio. Se expresa mediante la siguiente expresión:

$$EAL_S = \frac{\text{pérdida sísmica anual esperada [€]}}{\text{valor total del edificio [€]}} \quad [\%] \quad \text{Eq. 4.1}$$

Para calcular este parámetro, algunos autores emplearon procedimientos de evaluación de pérdidas económicas basados en una versión simplificada del enfoque desarrollado por PEER-PBEE (Menna *et al.*, 2021; Pohoryles *et al.*, 2020). Otro método consiste en calcularlo mediante la integración de la curva de Probabilidad anual de superación *vs.* Pérdida. Para ello se puede utilizar el planteamiento que establece el Eurocódigo 8. También podrá desarrollarse la curva Medida de intensidad *vs.* Medida de Daño (Bournas, 2018). Un enfoque probabilístico del mismo basado en diferentes vulnerabilidades se indica en Mastroberti *et al.* (2018).

Para poder comparar estos resultados con otros análogos derivados de la mejora energética, Calvi *et al.* (2016) propusieron un procedimiento similar basado en el consumo energético anual de los edificios. Lo denominaron el índice EAL_E . Obedece a la siguiente expresión:

$$EAL_E = \frac{\text{coste energético anual [€]}}{\text{valor total del edificio [€]}} \quad [\%] \quad \text{Eq. 4.2}$$

Así pues, se consiguen dos parámetros comparables que permiten la evaluación integrada de la eficiencia energética y la resiliencia sísmica desde el punto de vista económico.

Para obtener el coste energético anual se parte de los datos de consumo de calefacción y de refrigeración obtenidos de las simulaciones energéticas realizadas, bien en régimen dinámico o estacionario. Empleando los denominados coeficientes de paso, factores de conversión que convierten estos datos de energía final en energía primaria, se obtiene la cantidad de energía primaria que requiere el edificio estudiado. Finalmente, a partir de los datos de coste medio de la energía, se puede obtener el coste energético anual del edificio estudiado.

Teniendo en cuenta todo lo anterior, el ahorro anual de energía que supone la intervención resulta de la diferencia entre el coste antes y después de la intervención (Bournas, 2018):

$$\Delta EAL_E = EAL_{E, \text{ como se construyó}} - EAL_{E, \text{ rehabilitado}} \quad [\%] \quad \text{Eq. 4.3}$$

$$\Delta EAL_S = EAL_{S, \text{ como se construyó}} - EAL_{S, \text{ rehabilitado}} \quad [\%] \quad \text{Eq. 4.4}$$

De manera análoga se obtiene el beneficio sísmico, como una reducción de las pérdidas que se preveían antes de la intervención y las que se estiman después de esta (Bournas, 2018). Por tanto, la reducción total en las pérdidas anuales es el beneficio económico que se obtiene, que será la suma de los dos anteriores.

$$\Delta EAL = \Delta EAL_E + \Delta EAL_S \quad [\%] \quad \text{Eq. 4.5}$$

Para evaluar estos beneficios en relación con el coste de la intervención y, por tanto, conocer la viabilidad económica de las medidas que se lleven a cabo, se deben considerar parámetros como el valor actual neto (VAN) y el período de amortización. Estos se calcularán a partir de los datos obtenidos anteriormente.

Este procedimiento para obtener la rentabilidad económica de las diferentes actuaciones de mejora energética y sísmica es el que se ha empleado en la mayoría de las investigaciones existentes en la actualidad.

4.4.2. Evaluación del grado de sostenibilidad

En la mayoría de los sistemas planteados subyace un interés por lograr soluciones con un alto grado de sostenibilidad. Además, este es también uno de los objetivos que se persigue con la implementación de las actuaciones combinadas. Por ello, para decidir la combinación más idónea en cada caso, es fundamental conocer el grado de sostenibilidad de las diferentes opciones. Una serie de estudios han planteado metodologías de evaluación de la sostenibilidad, aplicables a análisis de ciclo de vida que incluyen el impacto ambiental de los posibles eventos sísmicos que puede sufrir un edificio a lo largo de su vida útil. Estas metodologías podrían emplearse para la evaluación de las diferentes estrategias de actuaciones combinadas.

En Belleri y Marini (2016) plantearon un procedimiento nuevo, denominado PBEE-Green, que evalúa en términos de huella de carbono y de forma probabilística la influencia de los eventos sísmicos en el impacto ambiental de los edificios. Este procedimiento aplicado a un modelo del edificio antes y después de su rehabilitación, permite obtener la mejora que supone la actuación en su impacto ambiental.

Un sistema de evaluación diferente es el que plantearon Caruso *et al.* (2020). Se trata de una metodología de ciclo de vida que permite la cuantificación explícita de las contribuciones económicas y ambientales de la construcción inicial, el consumo de energía, las reparaciones de daños debidos a terremotos, las estrategias de rehabilitación y la demolición. De esta forma se puede realizar una comparación cuantitativa entre varias opciones de rehabilitación. Esta metodología se aplicó para el análisis de diferentes conjuntos de actuaciones combinadas (Caruso *et al.*, 2021). Se comentaron algunos de los resultados obtenidos en el apartado 4.2.2 (página 71). Se trata de un procedimiento de gran interés para cuantificar el coste y las emisiones de dióxido de carbono, ambas en términos de ciclo de vida, de las diferentes intervenciones que se propongan.

Otros procedimientos para evaluar determinados parámetros relacionados con la sostenibilidad de las actuaciones se plantearon en Mauro *et al.* (2017) y en Menna *et al.* (2019). En Menna *et al.* (2022) se realizó un estudio comparativo en profundidad sobre todas estas metodologías, donde se analizan los beneficios y limitaciones de cada una de ellas.

Estos procedimientos suponen una evaluación desde un enfoque mucho más amplio que el que permiten las evaluaciones económicas, sísmicas o energéticas. Implican un mayor nivel de complejidad, pero sus resultados son de gran utilidad en la toma de decisiones. Además, suponen un primer paso hacia metodologías que puedan evaluar las diferentes actuaciones teniendo en cuenta todas las dimensiones de la sostenibilidad, es decir, los aspectos ambientales, sociales, económicos y culturales (Menna *et al.*, 2022).

4.5. CONCLUSIONES

La mejora de la sostenibilidad de los edificios vulnerables sísmicamente requiere implementar medidas encaminadas tanto a reducir su consumo energético como a incrementar su seguridad estructural. La combinación de las actuaciones necesarias para conseguir ambos objetivos en una misma intervención supone una optimización de los recursos empleados y del tiempo de ejecución de las obras. Además, resulta crucial para evitar que un terremoto pueda anular las medidas de eficiencia energética implantadas y también para prevenir situaciones de incompatibilidad entre las medidas, es decir, que una mejora estructural pueda afectar negativamente al comportamiento energético de los edificios, o viceversa.

En este capítulo se han analizado los criterios para establecer estas combinaciones y se ha reflexionado sobre las diferentes consideraciones que deben tenerse en cuenta, como la necesidad de que se conciben y desarrollen desde un enfoque integrado, holístico y de manera interdisciplinar. Además, se han expuesto diferentes investigaciones donde se analizan de forma comparada una serie de actuaciones combinadas aplicadas a casos de estudio. Todas ellas demuestran los beneficios económicos que suponen en comparación con las implementación de las mismas medidas llevadas a cabo por separado. También se han demostrado sus beneficios en términos de impacto ambiental. Sin embargo, es conveniente contar con un mayor número de estudios de este tipo que ofrezcan resultados sobre una mayor cantidad de tipologías edificatorias y zonas. Además sería necesario que estas investigaciones profundizaran aún más en el comportamiento energético y sísmico de las actuaciones. De esta manera se podrían obtener resultados concluyentes sobre los beneficios que aportan ciertas combinaciones en la rehabilitación de edificios existentes.

En este trabajo también se ha podido comprobar cómo los sistemas integrados suponen importantes ventajas adicionales en las actuaciones combinadas. Sin embargo, los sistemas propuestos y las investigaciones realizadas sobre ellos aún son escasas. En la mayoría de los casos se ha evaluado su comportamiento estructural, pero sus prestaciones térmicas y energéticas se encuentran todavía poco estudiadas. El sistema que ha sido objeto de un mayor número de investigaciones es el revestimiento que conjuga el mortero TRM y aislamiento térmico. Los diferentes estudios han arrojado resultados muy positivos, especialmente desde el punto de vista sísmico y económico. Sin embargo, incluye un material, el TRM, bastante novedoso, cuyo uso no se encuentra muy extendido en España, de manera que su disponibilidad es escasa. Además, no es compatible con las fábricas históricas. Sin embargo, para solventar esta última cuestión, en los últimos años se han propuesto nuevos sistemas alternativos a partir de materiales innovadores, sin contenido en cemento, que están obteniendo resultados muy prometedores.

No obstante, el mejor tipo de sistema integrado es aquel que mejor se adecúe a las necesidades concretas del caso de intervención que se esté estudiando. Por ello, es necesario seguir investigando en la búsqueda de nuevos sistemas que amplíen las posibilidades para poder dar respuesta a la infinidad de situaciones constructivas que suceden en el ámbito de la rehabilitación de edificios existentes. Estas investigaciones, además de profundizar en sistemas con materiales y técnicas innovadoras, deberán proponer soluciones basadas en técnicas convencionales, debido a las ventajas que proporcionan su disponibilidad, sencillez y menor coste. También cabe destacar el hecho de que se partiría de materiales y técnicas cuyas prestaciones ya han sido demostradas.

Sobre la toma de decisiones acerca de las actuaciones a adoptar en cada caso, se ha observado que requiere contar con sistemas de evaluación que integren tanto el comportamiento sísmico como el energético. En este trabajo se han indicado una serie de metodologías desarrolladas para ello. Están orientadas al análisis económico y a la cuantificación de determinados aspectos implicados en la sostenibilidad. No obstante, la complejidad de estas decisiones, así como la gran diversidad de tipos de intervenciones, requiere seguir avanzado en la búsqueda de nuevas metodologías de evaluación integradas. Desde procedimientos sencillos que permitan comparativas ágiles en pequeñas intervenciones, a conjuntos de indicadores o sistemas de análisis que permitan evaluar de una forma completa y detallada todos los aspectos de la sostenibilidad (económicos, ambientales, sociales y culturales) que influyen en las intervenciones de mayor alcance.

Además, este nuevo enfoque en la manera de abordar las actuaciones de mejora sísmica y energética requiere una serie de esfuerzos más allá del ámbito de la investigación. Por ello, resulta fundamental la transferencia de todo este conocimiento al sector de la construcción. Solo así se podrán implementar y promover las acciones necesarias para que llevarlo a la práctica y conseguir las mejoras deseadas en el parque edificatorio.

4.6. REFERENCIAS

- Artino, A., Evola, G., Margani, G. y Marino, E. M. (2019): «Seismic and energy retrofit of apartment buildings through autoclaved aerated concrete (AAC) blocks infill walls», *Sustainability (Switzerland)*, 11(14). <https://doi.org/10.3390/su11143939>
- Belleri, A. y Marini, A. (2016): «Does seismic risk affect the environmental impact of existing buildings?», *Energy and Buildings*, 110, 149-158. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.10.048>
- Borri, A., Corradi, M., Sisti, R., Buratti, C., Belloni, E. y Moretti, E. (2016): «Masonry wall panels retrofitted with thermal-insulating GFRP-reinforced jacketing», *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 49(10), 3957-3968. <https://doi.org/10.1617/s11527-015-0766-4>
- Bournas, D. A. (2018): «Concurrent seismic and energy retrofitting of RC and masonry building envelopes using inorganic textile-based composites combined with insulation materials: A new concept», *Composites Part B: Engineering*, 148, 166-179. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.04.002>
- Caicedo, C., Barbat, A., Canas, J. A. y Aguiar, R. (1994): «Vulnerabilidad sísmica de edificios», En A. H. Barbat (Ed.), *Monografías de Ingeniería Sísmica*. CIMNE-IS-6. Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería. <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/27020?locale-attribute=es>
- Calvi, G. M., Sousa, L. y Ruggeri, C. (2016): «Energy efficiency and seismic resilience: A common approach», en *Multi-Hazard Approaches to Civil Infrastructure Engineering*, 165-208. Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-29713-2_9
- Caprino, A., Lorenzoni, F., Carnieletto, L., Feletto, L., de Carli, M. y da Porto, F. (2021): «Integrated seismic and energy retrofit interventions on a urm masonry building: The case study of the former courthouse in fabriano», *Sustainability (Switzerland)*, 13(17). <https://doi.org/10.3390/su13179592>
- Caruso, M., Pinho, R., Bianchi, F., Cavalieri, F. y Lemmo, M. T. (2020): «A life cycle framework for the identification of optimal building renovation strategies considering economic and environmental impacts», *Sustainability (Switzerland)*, 12(23), 1-20. <https://doi.org/10.3390/su122310221>
- Caruso, M., Pinho, R., Bianchi, F., Cavalieri, F. y Lemmo, M. T. (2021): «Integrated economic and environmental building classification and optimal seismic vulnerability/energy efficiency retrofitting», *Bulletin of Earthquake Engineering*, 19(9), 3627-3670. <https://doi.org/10.1007/s10518-021-01101-4>

- Coppola, L., Coffetti, D., Crotti, E., Marini, A., Passoni, C. y Pastore, T. (2019): «Lightweight cement-free alkali-activated slag plaster for the structural retrofit and energy upgrading of poor quality masonry walls», *Cement and Concrete Composites*, 104. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.103341>
- Duo System. Recuperado el 9 de junio de 2022 de <https://duosystem.eu/>
- Ferrante, A., Mochi, G., Predari, G., Badini, L., Fotopoulou, A., Gulli, R. y Semprini, G. (2018): «A European project for safer and energy efficient buildings: Pro-GET-onE (proactive synergy of integrated efficient technologies on buildings' envelopes)», *Sustainability (Switzerland)*, 10(3). <https://doi.org/10.3390/su10030812>
- Formisano, A. y Vaiano, G. (2021): «Combined Energy-Seismic Retrofit of Existing Historical Masonry Buildings: The Novel "DUO System" Coating System Applied to a Case Study», *Heritage*, 4(4), 4629-4646. <https://doi.org/10.3390/heritage4040255>
- Gavilán Casal, A. (2015): *Análisis comparativo de la eficiencia energética en edificios existentes con herramientas de simulación energética* [Tesis doctoral]. Universidad de Valladolid.
- Gkournelos, P. D., Bournas, D. A. y Triantafyllou, T. C. (2019a): *Combined seismic and energy upgrading of existing buildings using advanced materials Case studies on Reinforced Concrete Buildings in South Europe*. <https://doi.org/10.2760/17376>
- Gkournelos, P. D., Bournas, D. A. y Triantafyllou, T. C. (2019b): «Combined seismic and energy upgrading of existing reinforced concrete buildings using TRM jacketing and thermal insulation», *Earthquake and Structures*, 16(5), 625-639. <https://doi.org/10.12989/eas.2019.16.5.625>
- Maldonado Rondón, E., Gómez Araújo, I. y Chio Cho, G. (2008): «Funciones de vulnerabilidad y matrices de probabilidad de daño sísmico para edificaciones de mampostería utilizando técnicas de simulación». *DYNA*, 75(155).
- Manfredi, V. y Masi, A. (2018): «Seismic strengthening and energy efficiency: Towards an integrated approach for the rehabilitation of existing RC buildings», *Buildings*, 8(3). <https://doi.org/10.3390/buildings8030036>
- Marini, A., Passoni, C., Belleri, A., Feroldi, F., Preti, M., Metelli, G., Riva, P., Giuriani, E. y Plizzari, G. (2017): «Combining seismic retrofit with energy refurbishment for the sustainable renovation of RC buildings: a proof of concept», *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 1-21. <https://doi.org/10.1080/19648189.2017.1363665>
- Mastroberti, M., Vona, M., Manganelli, B., Bournas, D. y Palermo, V. (2018): «Combined seismic plus energy retrofitting for the existing RC buildings: economic feasibility», *16th Conference on Earthquake Engineering*. <https://www.researchgate.net/publication/330400100>
- Mauro, G. M., Menna, C., Vitiello, U., Asprone, D., Ascione, F., Bianco, N., Prota, A. y Vanoli, G. P. (2017): «A multi-step approach to assess the lifecycle economic impact of seismic risk on optimal energy retrofit», *Sustainability (Switzerland)*, 9(6). <https://doi.org/10.3390/su9060989>
- Menna, C., del Vecchio, C., di Ludovico, M., Mauro, G. M., Ascione, F. y Prota, A. (2021): «Conceptual design of integrated seismic and energy retrofit interventions», *Journal of Building Engineering*, 38. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102190>
- Menna, C., Felicioni, L., Negro, P., Lupísek, A., Romano, E., Prota, A. y Hájek, P. (2022): «Review of methods for the combined assessment of seismic resilience and energy efficiency towards sustainable retrofitting of existing European buildings», *Sustainable Cities and Society*, vol. 77. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103556>
- Menna, C., Vitiello, U., Mauro, G. M., Asprone, D., Bianco, N. y Prota, A. (2019): «Integration of Seismic Risk into Energy Retrofit Optimization Procedures: A Possible Approach Based on Life Cycle Evaluation», *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 290(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/290/1/012022>
- Morales Esteban, A., Romero Sánchez, E., Zapico Blanco, B., Requena García de la Cruz, M. V., de Miguel Rodríguez, J. y Estevao, J. (2020): *Rehabilitación sísmica estructural de colegios de educación primaria*. Editorial Universidad de Sevilla.
- 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*.

- Pohoryles, D. A., Maduta, C., Bournas, D. A. y Kouris, L. A. (2020): «Energy performance of existing residential buildings in Europe: A novel approach combining energy with seismic retrofitting», *Energy and Buildings*, 223. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110024>
- Takeuchi, T., Yasuda, K. y Iwata, M. (2009): «Seismic retrofitting using energy dissipation Façades», *Improving the Seismic Performance of Existing Buildings and Other Structures – Proc. 2009 ATC and SEI Conference on Improving the Seismic Performance of Existing Buildings and Other Structures*, 1000-1009. [https://doi.org/10.1061/41084\(364\)91](https://doi.org/10.1061/41084(364)91)
- Triantafillou, T. C., Karlos, K., Kapsalis, P. y Georgiou, L. (2018): «Innovative Structural and Energy Retrofitting System for Masonry Walls Using Textile Reinforced Mortars Combined with Thermal Insulation: In-Plane Mechanical Behavior», *Journal of Composites for Construction*, 22(5), 04018029. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)cc.1943-5614.0000869](https://doi.org/10.1061/(asce)cc.1943-5614.0000869)
- Triantafillou, T. C., Karlos, K., Kefalou, K. y Argyropoulou, E. (2017): «An innovative structural and energy retrofitting system for URM walls using textile reinforced mortars combined with thermal insulation: Mechanical and fire behavior», *Construction and Building Materials*, 133, 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.con-buildmat.2016.12.032>

5

La caracterización patrimonial en barriadas del siglo XX. El caso de El Plantinar en la ciudad de Sevilla

Julia Díaz-Borrego* y Julia Rey Pérez**

* *Departamento de Estructuras de Construcciones Arquitectónicas I
Universidad de Sevilla*

** *Departamento de Historia, Teoría y Composición Arquitectónicas
Universidad de Sevilla*

RESUMEN

El devenir demográfico, político, social y económico de los últimos 60 años ha manifestado la dificultad que tiene la arquitectura residencial de adaptarse a las necesidades del cambio de siglo, sufriendo en muchos casos el abandono por parte de la administración así como de la propia ciudadanía. Sin embargo, este conjunto arquitectónico agrupado en las denominadas barriadas, implicó un cambio de época y una transformación conceptual en la forma de hacer ciudad, lo que ha hecho que desde distintos organismos internacionales se plantee la necesidad de implantar una mirada patrimonial a este tipo de arquitectura.

El presente capítulo de libro pretende conocer y reflexionar sobre el proceso de desarrollo de estas barriadas, concretamente en el caso de El Plantinar, el cual fue uno de los barrios concebidos para albergar a un gran número de personas y que hoy son un referente clave en el Paisaje Urbano Histórico de la ciudad de Sevilla. Este enfoque se considera clave para identificar la singularidad patrimonial de esta barriada.

La metodología propuesta para abordar la valoración patrimonial de El Plantinar debe poder ser extrapolable a otras barriadas similares del siglo XX. Se estructura en tres fases: Fase I, donde se realiza un estudio general del barrio de El Plantinar en tres escalas: urbana, objetual-tipológica y perceptiva con la intención de obtener un diagnóstico general de la barriada. En la Fase II se identifican los atributos y valores culturales del conjunto urbano. Por último, se propone una Fase III en la que se definirán criterios sobre cómo intervenir en esta barriada. Los resultados esperados ayudarán a comprender el proceso de modernización que ha sufrido la ciudad, así como el valor patrimonial de esta arquitectura en la construcción de la memoria colectiva.

5.1. INTRODUCCIÓN

El proceso de modernización que experimentó España, y en concreto la transformación que sufrió la ciudad de Sevilla, se produjo a través de las iniciativas de los gobiernos nacionales y locales a partir de la década de 1960. Parte de estas actuaciones fue la ejecución de numerosas barriadas residenciales que prepararon a Sevilla para el cambio de época. Este proceso fue posible gracias a la puesta en marcha de políticas públicas que mostraban la inminente necesidad de nuevos programas arquitectónicos, así como de arquitectura en altura construida en hormigón armado. No obstante, el devenir de los últimos 60 años ha manifestado la dificultad de adaptarse por parte de esta arquitectura residencial a las necesidades del cambio de siglo, sufriendo en muchos casos el abandono, no solo por parte de la administración, si no de la propia ciudadanía. Sin embargo, esta arquitectura implicó un cambio de época y una transformación conceptual en la forma de hacer ciudad, lo que ha hecho que desde distintos organismos internacionales se plantee la necesidad de implantar una mirada patrimonial a este tipo de arquitectura.

Es en los inicios del siglo XXI cuando todas estas cuestiones relacionadas con la visión patrimonial de determinada arquitectura del siglo XX son contempladas por otros organismos internacionales especializados en materia de patrimonio cultural. En 2001, UNESCO, ICOMOS y DOCOMOMO inician un programa conjunto para la identificación, documentación y promoción del patrimonio arquitectónico de los siglos XIX y XX (contempla igualmente las intervenciones en el medio urbano, en los conjuntos y los patrones de la ciudad, en las infraestructuras y en las obras de ingeniería, o el paisaje (Oers, 2003: 10). Esta primera reunión de expertos, celebrada en la sede de la UNESCO de París en octubre de 2001, significa el arranque de esta novedosa manera de mirar el patrimonio contemporáneo (Bandarín, 2003: 4). Entre las cuestiones que se ponen sobre la mesa, se detecta la necesidad de superar la mirada hacia el patrimonio de esos siglos a través del objeto-monumento. Se deben identificar los procesos históricos y las actividades socioeconómicas con un enfoque diferente para definir los procesos y las tendencias significativas de la modernización. Únicamente a partir de la identificación de estos procesos se podrán definir los temas (o fenómenos) específicos de la era de la modernización y evitar las cuestiones de estilo y tipología para cualquier clasificación (Oers, 2003: 12). También se expresa la singularidad de los «bienes patrimoniales modernos», caracterizados por el conocimiento de su autor, la idea de proyecto y la revolución tecnológica y constructiva que implicó su materialización. Ambas cuestiones, unidas a la cercanía temporal y a la ausencia de la superposición de estratos temporales e históricos, propician un acercamiento novedoso a este patrimonio, donde la reflexión en torno a las ideas originales del proyecto del autor, que generaron el bien, se incorpora como el nuevo valor patrimonial, aunque no sea el único.

Ya en la *Recomendación del Consejo de Europa* se abordan aspectos de los criterios de selección. Se plantea la necesidad de dar protección no solo a las obras más significativas del panorama contemporáneo, sino también a ejemplos menos conocidos que todavía tienen importancia para la arquitectura y la historia de la época (Recommendation no. r (91) 13, 1991). Esta cuestión se pone de manifiesto en el *Documento de Madrid 2011*, donde se destaca la importancia de reconocer el valor patrimonial de toda la gama de estilos, tipos y métodos de construcción del

siglo XX. Lo mismo sucede con la importancia de incluir entre los factores de selección, además de los aspectos estéticos, aquellas contribuciones a la historia de la tecnología y el desarrollo político, cultural, económico y social (Icomos, 2011). En ambos documentos se hace referencia a la superación del objeto arquitectónico para incorporar al panorama patrimonial contemporáneo estructuras, polígonos, conjuntos residenciales, nuevas ciudades y pueblos, espacios públicos, equipamientos, elementos decorativos y mobiliario. Se incide también en cualificar la conservación del patrimonio arquitectónico promoviendo estudios científicos, teóricos y prácticos sobre los métodos de construcción, mantenimiento y restauración y en formar especialistas en este campo, debido a su singularidad. Otras de las cuestiones que se recogen, tanto en la *Recomendación del Consejo de Europa* como en el *Documento de Madrid 2011*, son la necesidad de plantear nuevos usos del elemento patrimonial, acordes a la sociedad contemporánea, para luchar contra el abandono o la ruina del elemento y la necesidad de fomentar la concienciación de la ciudadanía a través de políticas que promuevan el conocimiento del patrimonio del siglo XX con respecto a estos patrimonios emergentes (campañas de publicidad, publicaciones especializadas, debates públicos o experimentos educativos).

Como se puede comprobar una vez mostrados los hechos, la arquitectura residencial también se incorpora a este panorama, demandándose una mirada más cuidadosa e inclusiva hacia estos patrimonios más invisibilizados. En definitiva, el objetivo de todas estas reuniones e investigaciones es el de paliar los procesos de obsolescencia y abandono, últimamente más generalizados, de este patrimonio cercano, que además están comenzando a ser transformados sin contemplar criterios patrimoniales para su intervención.

En el caso de Sevilla, desde hace relativamente poco, la cuestión del patrimonio moderno vinculado con la vivienda está empezando a ser tenido en cuenta, como es el caso de la investigación Re-Habitar en el barrio de El Carmen (Gómez, 2019). En este sentido, la presente investigación pretende conocer y reflexionar el proceso de desarrollo de estos barrios, concretamente en el caso de El Plantinar, el cual fue uno de los barrios concebidos para albergar a un gran número de personas y que hoy son un referente clave en el Paisaje Urbano Histórico de la ciudad de Sevilla. Se considera clave identificar la singularidad patrimonial de esta barriada.

La metodología propuesta para abordar la valoración patrimonial de barriadas del siglo XX va a ser testada en el El Plantinar, con el objetivo de poder ser extrapolable a otras barriadas similares. Se estructura en tres fases: Fase I, donde se realiza un estudio general del barrio de El Plantinar en tres escalas: urbana, objetual-tipológica y perceptiva con la intención de obtener un diagnóstico general de la barriada. En la Fase II se identificarán los atributos y valores culturales del conjunto urbano en cuestión que nos ayuden a determinar la carga patrimonial de la barriada. Por último, se propone una Fase III en la que se definirán criterios sobre cómo intervenir en esta barriada para garantizar su presencia a futuro en el paisaje urbano de la ciudad de Sevilla, adaptarse a los nuevos requerimientos contemporáneos, pero sin perder sus atributos y valores patrimoniales que lo definen. Los resultados esperados ayudarán a comprender el proceso de modernización que ha sufrido la ciudad, así como el valor patrimonial de esta arquitectura en la construcción de la memoria colectiva. No obstante, en este capítulo de libro se van a exponer los resultados vinculados a la Fase primera, esbozándose brevemente la caracterización patrimonial que permite introducir el resto de las fases.

5.2. CONTEXTO POLÍTICO ESPAÑOL. ANTECEDENTES

El final de la Guerra Civil marcó el inicio de una etapa de necesaria reconstrucción, a la que sucedería otra de desarrollo urbano posterior. La política de promoción pública de viviendas se enmarca así, en España, en dos grandes etapas: una primera fundamentalmente de reconstrucción y una segunda de desarrollo, que desencadenaría en la creación de un renovado parque de viviendas (Pareja López y Peña Fernández, 1994). A comienzos de la década de los 50, España dejaba a un lado las medidas proteccionistas y emprendía un nuevo período de desarrollo social y económico. Este período estuvo marcado por una gran actividad migratoria del medio rural al urbano. Las principales ciudades españolas duplicaron, o incluso triplicaron, su población. Sevilla pasó de tener una población de 312.123 a 548.072 habitantes (INE, 2018) (Guajardo-Fajardo, 2018; Pareja López y Peña Fernández, 1994). Esta migración, sumado al crecimiento demográfico, agravó la problemática de déficit residencial que sufrían estas ciudades. Esto llevó al gobierno franquista a emprender determinadas políticas de promoción pública de viviendas que equipararían todas las capitales de provincia con numerosos y extensos polígonos o barrios residenciales construidos desde cero. La promoción pública de vivienda fue desarrollada en los núcleos urbanos, por el Instituto Nacional de Vivienda.

El INV se propuso como objetivo dentro del Plan Sindical de la Vivienda la construcción de más de 20.000 viviendas anuales en todo el país estimando las necesidades para Andalucía en el período 56-72 en 196.000 viviendas de las que 65.000 se construirían en las capitales y el resto en las provincias.

(Pareja López y Peña Fernández, 1994)

Los planteamientos del INV, regido por el funcionalismo y la racionalidad, llevaron a cabo estudios tipológicos, estableciendo superficies, programas y tipos de amueblamiento según el tipo de vivienda. En un principio se propusieron dos tipos de viviendas: de renta mínima y de renta reducida (Pareja López y Peña Fernández, 1994), que posteriormente serían sustituidas por las de Renta Limitada. Este sistema buscaba unificar en una ley única toda la intervención pública que afectase a la vivienda y así de esta forma servir como base a un Plan Nacional (Guajardo-Fajardo, 2018). Este régimen se enmarca dentro del Plan Nacional de Vivienda, llevado a cabo entre 1955 y 1960. Dicho Plan introducía un consenso, a nivel nacional, respecto a la tipificación y normalización de la vivienda, así como de sus elementos constructivos, obligando a construir según lo estipulado por el INV (Guajardo-Fajardo, 2018).

La puesta en marcha del Plan Nacional de Vivienda se basó en el análisis previo del censo de edificios y viviendas necesario para estimar el déficit residencial. Dicho análisis permitió conocer las características, calidad y cantidad de alojamientos españoles, tal y como se muestra a continuación.

[...] del total de edificios residenciales existentes un 87% estaba constituido por una sola vivienda, un 7% por dos, un 2% por tres, un 1% por cuatro y un 3% por cinco o más. Y en cuanto a los servicios de que estas disponían los resultados eran sorprendentes: sólo un 34% contaba con agua corriente, un 9% tenía baño o ducha, un 3% calefacción y un 79% alumbrado eléctrico.

Para la distribución geográfica del total de las viviendas se dio preferencia a las ciudades en las que se pensaba que existía una mayor urgencia. Es por ello que se pretende construir primero en las grandes ciudades donde la escasez era más notable: Madrid, Barcelona, Bilbao, Sevilla, Valencia, Oviedo, Zaragoza, Campo de Gibraltar y Málaga.

Los objetivos fundamentales del plan eran cuatro: a) intentar dar acceso a las clases más desfavorecidas a una vivienda digna; b) dirigir técnicamente y ordenar la actividad constructiva; c) proteger económicamente la edificación de las viviendas, y d) atraer y fomentar la iniciativa privada, a fin de lograr su concurso para la edificación de toda clase de vivienda.

(Guajardo-Fajardo, 2018)

En el caso de Sevilla, la ciudad sufrió entre la segunda mitad del siglo XIX y la primera del XX, un desarrollo económico y un crecimiento demográfico que duplicó su población. Este aumento demográfico supuso la congestión urbana del centro histórico y la necesaria urbanización de las áreas periféricas. Dicha urbanización se llevaría a cabo a finales del XIX, sin la planificación previa de ensanches, sino mediante la construcción de pequeños barrios no siendo hasta el siglo XX, cuando experimentó procesos de urbanización a mayor escala. *Este desarrollo económico fue, en gran medida, fruto del crecimiento de la industrialización, que a su vez condicionaría las directrices de urbanización de la periferia.*

[...] aunque la industria sevillana no abandonó ni mucho menos el casco urbano histórico, si jugó un papel trascendental a la hora de urbanizar nuevos espacios, marcando las directrices del crecimiento de la ciudad.

(Almuedo Palma, 1996)

La cercanía a las vías de comunicación (ferrocarriles y carreteras) condicionó el emplazamiento de diversas industrias como la fábrica de cerámicas y losetas «El Porvenir», la fábrica Pirotecnia Militar del Ministerio de la Guerra y las fábricas de Superfosfatos y ácido sulfúrico San Carlos S.A. (figura 5.1 [1956]), que serían el origen de la urbanización del sector del Distrito Sur. Posteriormente, se implantaría la barriada de El Plantinar, convirtiéndose en una de las primeras barriadas residenciales de la zona (1969, 1977).



Figura 5.1. Vuelos históricos de Sevilla: (de izq. a dcha.) fotografías aéreas de 1956, 1969 y 1977.
Visor de Vuelos Históricos de la Gerencia de Urbanismo. Julia Díaz-Borrego

5.3. FASE I CARACTERIZACIÓN PATRIMONIAL

5.3.1. Análisis desde la escala urbana

Evolución trama urbana de Sevilla

El crecimiento económico y demográfico experimentado en la ciudad de Sevilla, consecuencia del fin de la guerra civil y potenciado por la revolución industrial, supuso la congestión urbana del casco histórico y posterior urbanización de las áreas periféricas.

El desarrollo de la industrialización marcó y dirigió las pautas de crecimiento de la ciudad (Almuedo Palma, 1996). Por ello, la proximidad a las vías principales de comunicación condicionó el emplazamiento y los patrones de la nueva urbanización. De este modo, el origen del sector del Distrito Sur que nos atañe estuvo marcado por el emplazamiento de diversas industrias: la fábrica de cerámicas y losetas «El Porvenir», la fábrica Pirotecnia Militar del Ministerio de la Guerra y las fábricas de Superfosfatos y ácido sulfúrico San Carlos S.A. (1956) (resaltadas en figura 5.1). El posicionamiento de las mismas no fue arbitrario, su situación estuvo condicionada por la estructura de conexiones urbanas, ubicándose junto a las arterias principales de comunicación –ferrocarril y carreteras–.

Ya en la segunda mitad del siglo XX, la gran actividad migratoria del medio rural al urbano, sumado al crecimiento demográfico, agravó la problemática del déficit residencial (Guajardo-Fajardo, 2018; Pareja López y Peña Fernández, 1994). Esto llevó al gobierno franquista a emprender determinadas políticas de promoción pública de viviendas que equiparían todas las capitales de provincia con numerosos y extensos polígonos o barrios residenciales construidos desde cero (Pareja López y Peña Fernández, 1994). Así, respondiendo al cese de actividad de muchas de las fábricas mencionadas, y a las necesidades de aumentar el parque residencial, se llevaría a cabo una nueva transformación urbana y desarrollo periférico de la ciudad de Sevilla.

En este contexto, en el epicentro de lo que previamente fuera una zona de fuerte carácter industrial, se levantaba en 1964 la barriada de El Plantinar. La obsolescencia y cese de actividad de dichos equipamientos industriales daban paso a una nueva etapa en el desarrollo urbano de la ciudad. Así, en una zona todavía poco edificada de la urbe, se implantaba el conjunto residencial de El Plantinar, siendo una de las primeras barriadas residenciales en un entorno aún industrial-rural; en el extremo norte del Distrito Sur, lindando con el barrio de Nervión (figura 5.1, [1969]).

Relación de la barriada con el contexto urbano

Como se ha mencionado, El Plantinar se encuentra emplazado en un centro nodal. Su situación, entre dos vías principales de conexión, le transfiere una situación estratégica a nivel territorial (figura 5.2). Sin embargo, la densidad urbana del conjunto residencial no responde a la que le correspondería, hoy día, por su emplazamiento junto a grandes equipamientos urbanos y arterias de comunicación. Por su parte, fruto de su situación estratégica en la ciudad, el entorno construido con posterioridad a la barriada sí responde a esta realidad, tendiendo a una mayor rentabilidad edificatoria y, por tanto, a soluciones tipológicas más densas y de mayor altura. Como resultado, la barriada queda rodeada por una masa edificada que contrasta con esta y, a su vez, la «envuelve» y aísla del entorno. Así, la inexistencia de diálogo, tanto arquitectónico como espacial entre El Plantinar y su entorno, se hace latente en los límites de la barriada, aislando la barriada social y espacialmente (figura 5.3).

A este respecto, merece mención especial la reciente edificación que linda en el extremo norte con el conjunto residencial, cuyas dimensiones, arquitectura y materialidad contrastan fuertemente con la realidad y escala urbana de El Plantinar (figura 5.4).

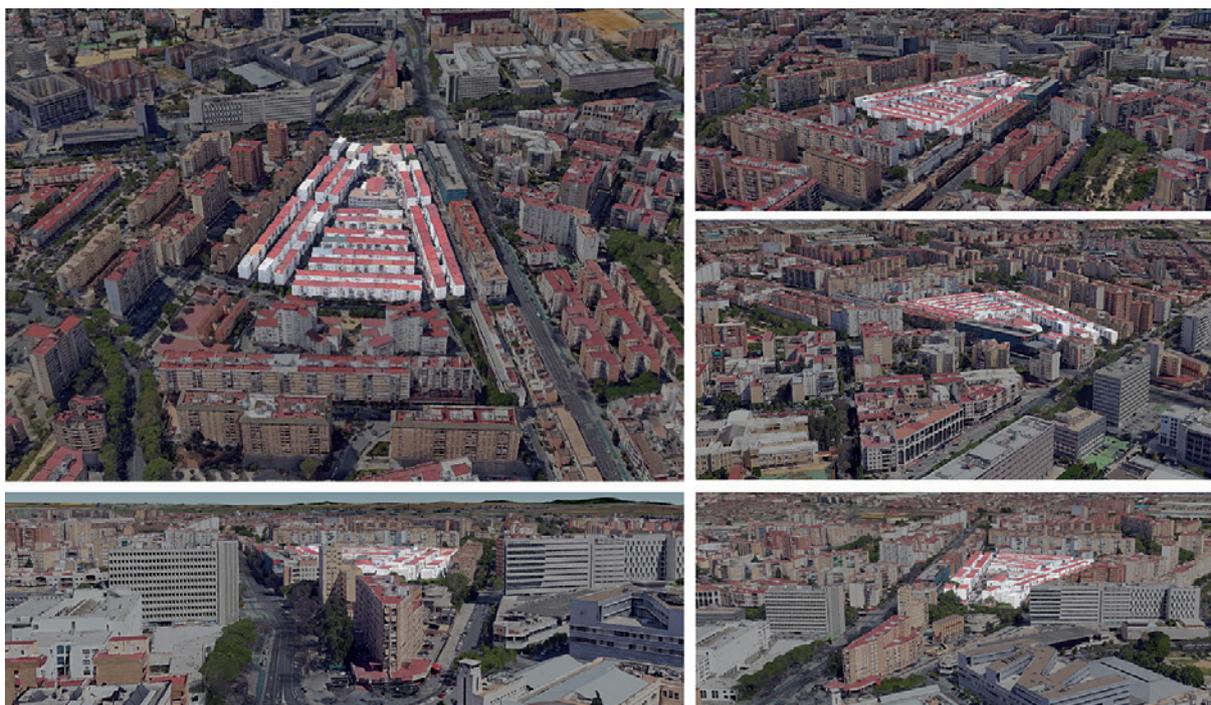


Figura 5.2. Vista de pájaro en la que se aprecia la relación de la barriada con el contexto urbano, 2022.
Julia Díaz-Borrego



Figura 5.3. Fotografías de los límites de la barriada y su relación con el entorno próximo, 2022. Julia Díaz-Borrego



Figura 5.4. Fotografía del límite norte de la barriada y su encuentro y relación con las construcciones más recientes, 2022. Julia Díaz-Borrego

Relación de la barriada con el Patrimonio Municipal

La barriada de El Plantinar cuenta con una situación urbana privilegiada; situada entre vías principales de comunicación, en un entorno próximo al casco histórico urbano. En este sentido, tal y como queda reflejado en la figura 5.5, en el entorno del conjunto residencial objeto de estudio, son numerosos los elementos, urbanos y arquitectónicos, que forman parte del contexto patrimonial del área metropolitana de Sevilla. Entre ellos, cabe destacar los diferentes conjuntos residenciales, barriadas y viviendas, que cuentan con algún nivel de protección municipal: el edificio de viviendas c/ Ramón y Cajal, 28; las viviendas del Patronato Municipal de Casas Baratas; el grupo de viviendas del INV Avda. Gral. Merry; la barriada Los Diez Mandamientos; las viviendas y estación de autobuses del Prado de San Sebastián. Además de la barriada de El Tardón que, aunque algo más alejada, cuenta con numerosas características, históricas, sociales, arquitectónicas y urbanas, similares a la barriada objeto de este estudio.

El análisis comparativo entre estas barriadas y conjuntos de viviendas protegidas, y la barriada de El Plantinar, puede poner de manifiesto diferentes valores patrimoniales intrínsecos a la barriada que están aún por descubrir y definir en su caso particular.

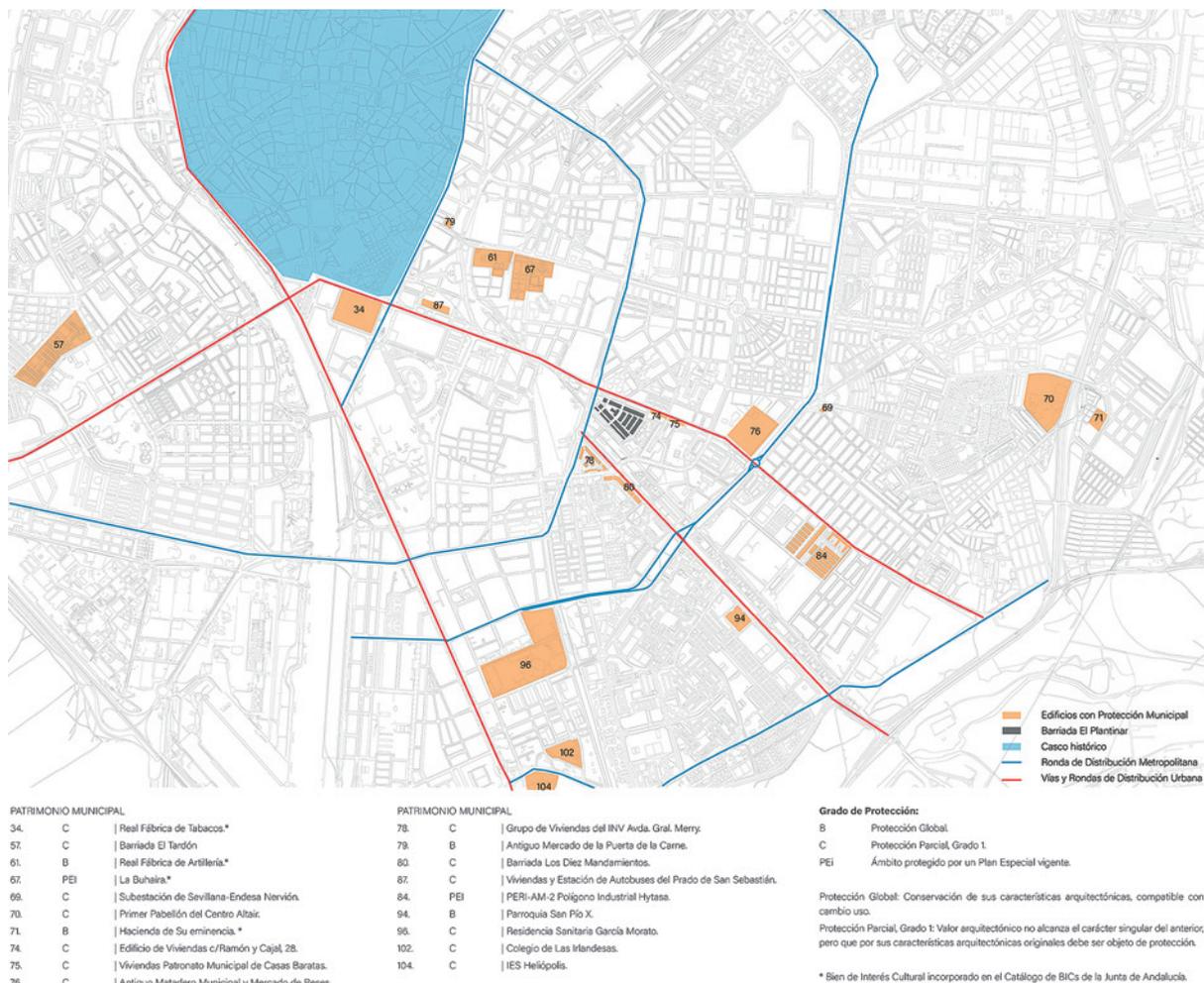


Figura 5.5. Localización urbana del objeto de estudio. Relación de la barriada con el Patrimonio Municipal. Análisis de la barriada de El Plantinar (Sevilla). Julia Díaz-Borrego

Usos y equipamientos

Por una parte, fruto de su situación privilegiada y estratégica dentro de la ciudad, el entorno está dotado de una gran y diversa oferta de equipamientos urbanos: campus universitario, colegios, centros comerciales, hostelería y tiendas de alimentación, hoteles, edificios de oficinas... (figura 5.6). Por otra parte, en el interior de la barriada, el marcado carácter residencial define al conjunto. En él, encontramos, también, una gran diversidad de equipamientos de índole y escala más local. Destaca la calle Virgen del Sol, equipada en planta baja con todo tipo de comercios locales y hostelería, que dota al vecindario de todo lo necesario. Asimismo, también encontramos pequeño comercio en la calle Igueldo y, puntualmente en la calle Guadarrama. Así, el marcado carácter local del comercio de barrio y de la realidad y actividad cotidiana de la barriada responden a unos tiempos y ritmos que contrastan con la realidad y ritmos comunes a la escala urbana del entorno inmediato.



Figura 5.6. Planimetría de la edificación del entorno de la barriada de El Plantinar por usos. Datos del catastro, 2021. Fotografías Calle Virgen del Sol. Julia Díaz-Borrego

Flujos y recorridos. Ocupación espacio público

La escala local del conjunto define la actividad y los ritmos sociales que se desarrollan en este lugar. En el estrecho viario impera la abundante presencia del vehículo privado estacionado en



Figura 5.7. Planimetría de la edificación del entorno de la barriada de El Plantinar por usos y sección genérica del viario actual. 2022. Julia Díaz-Borrego

sendos laterales de la calzada, así como la presencia de arbolado de bajo porte (naranjos) en el acerado (figura 5.7).

El viario rodado, en general, es de sentido único, excepto en la calle Virgen del Sol, de mayor anchura, que cuenta con dos carriles. Por su parte, los flujos peatonales se concentran en la calle Virgen del Sol (figura 5.6) que, al ser la que cuenta con la mayor dotación de equipamientos del conjunto, es la más transitada. Así, esta calle, de situación céntrica respecto al conjunto, es la que funciona de charnela y conexión entre la barriada y el entorno, siendo en esta calle donde se lleva a cabo la mayor actividad de intercambio y relación entre los habitantes de El Plantinar y los vecinos de las zonas colindantes.

Asimismo, al estar situado junto a vías principales de circulación y conexión, cuenta con una rica dotación de transporte público. En las proximidades de la barriada, en el campus universitario de Viapol, se sitúa uno de los principales intercambiadores modales de la ciudad (autobús, cercanías, trenes de media distancia, tranvía). Por su parte, en relación a la ocupación por estacionamiento del transporte privado, el hecho de que en el entorno próximo a la barriada abunde la «zona azul» (estacionamiento mediante pago), hace que el estrecho viario del interior de la barriada –de estacionamiento libre– se encuentre saturado de vehículos asiduamente.

La desaparición o pérdida de protagonismo del coche en el espacio público, en favor del peatón, podría beneficiar al conjunto, dando lugar a espacios libres de calidad. La escala local de la barriada le transfiere un gran potencial ambiental. Este potencial podría explotarse a través de la conquista y puesta en valor del espacio libre de la misma, favoreciendo el encuentro y la conexión con el entorno inmediato.

Confort y salud

La obstrucción producida por el entorno urbano es el principal factor físico que afecta al confort lumínico (Xue *et al.*, 2014) y a una adecuada crono-regulación de los ritmos biológicos por la falta

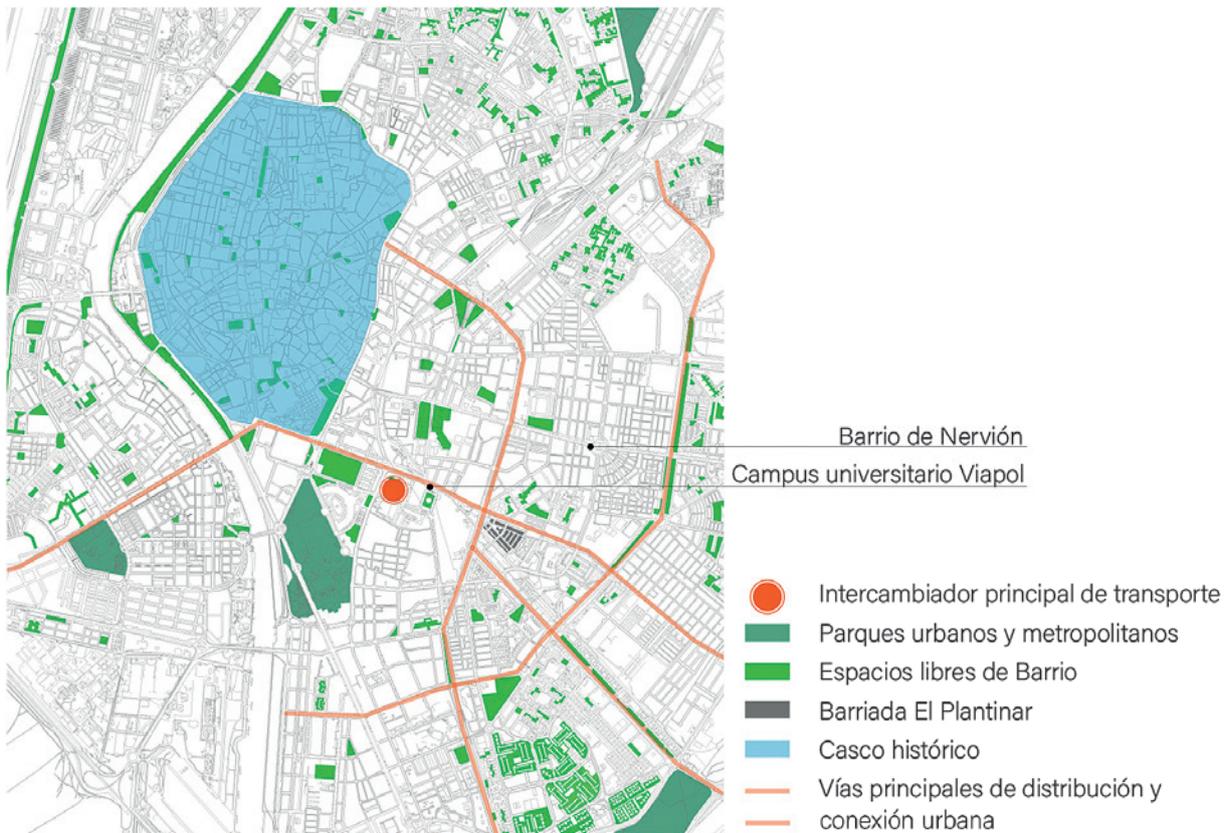


Figura 5.8. Localización urbana del objeto de estudio. Accesibilidad y espacio público a escala urbana. Análisis de la barriada de El Plantinar (Sevilla). Julia Díaz-Borrego

de acceso a la luz natural (Aguilar-Carrasco *et al.*, 2021). Además, la forma urbana afecta al rendimiento energético del edificio, suponiendo hasta un incremento del 10 % en su consumo (Ratti *et al.*, 2005). La configuración urbana también afecta a las variables climáticas y micro-climáticas, teniendo un papel decisivo en el fenómeno de isla de calor urbano, responsable principal del estrés térmico nocturno. Como señala Givoni (Oke, 1988), «la temperatura exterior, la velocidad del viento y la radiación solar a la que está expuesto un edificio individual no es el clima regional sinóptico, sino el micro-clima local modificado por la estructura de la ciudad». Así, el micro-clima determina la calidad del ámbito exterior, modificando el clima regional y afectando, junto al acceso solar de los edificios, al confort y la salud de los habitantes.

A este respecto, cabe destacar que para analizar la influencia de la morfología urbana en el micro-clima y la accesibilidad de luz natural, el principal parámetro de análisis es la proporción del cañón urbano, término acuñado por Oke (Oke, 1988) que especifica la relación entre la altura de la edificación y el ancho de viario (H/W). La orientación y proporciones del cañón urbano influyen en el potencial de acceso solar, los flujos de aire y otros datos micro-climáticos como el efecto de isla de calor urbano.

En relación al cañón urbano, un estudio previo con caso de estudio en Sevilla concluyó que las proporciones inferiores a 4/5 mejoran significativamente el acceso solar en los edificios, sin suponer un aumento térmico significativo en el ámbito exterior si dicha proporción es mayor o igual a 4/5 (Díaz-Borrego *et al.*, 2021).

Orientaciones de la barriada. Ventilación del viario y acceso solar

La disposición de los bloques del conjunto, conformando una punta de flecha, da lugar a tres orientaciones diferentes de los bloques urbanos. Los situados en las calles centrales cuentan con una orientación NO-SE, mientras que los que limitan la barriada al norte y al sur, pese a tener diferentes orientaciones entre sí, cuentan, ambos, con una orientación NE-SO.

En relación al acceso solar interior y al micro-clima exterior, las orientaciones de los bloques parecen lograr una mayor homogeneidad de accesibilidad solar en el interior de todas las viviendas, así como de condiciones micro-climáticas en el viario exterior (y ventilación de los cañones urbanos), frente a orientaciones N-S o E-O (Díaz-Borrego *et al.*, 2021).

Densidad urbana y proporción H/W: iluminación natural y ventilación viaria

Tal y como ya se ha mencionada, existe un alto contraste entre la densidad edificatoria del conjunto objeto de análisis y su entorno urbano. El conjunto está compuesto por edificios de viviendas lineales que cuentan con planta baja más cuatro alturas –con una altura libre de planta entre 2.60 y 2.70 metros– y dos viviendas por plantas. Así, la altura de la edificación no supera los 15.50 metros, mientras que las edificaciones del entorno superan, de media, los 25 metros de altura (figura 5.9).

Pese a la baja densidad urbana de El Plantinar, las proporciones del cañón urbano son, de media, elevadas (1.44) (figura 5.10). Esto es debido a que, pese a que la edificación no cuente con grandes alturas (15.50 metros, de media) la anchura del viario, de escala más local, es pequeña (11 metros), dando lugar a cañones estrechos. En estas proporciones de cañón, la ventilación del mismo es menor y el soleamiento de las viviendas se ve obstaculizado por el sombreado mutuo de los bloques. Por su parte, en la calle Virgen del Sol, cuyo viario tiene una anchura de 21 metros, así como en las viviendas con fachada a la Plaza del Aljarafe (figura 5.6), las proporciones del cañón son más favorables. La proporción de cañón de la calle Virgen del Sol (figura 5.6), H/W de 0.75,

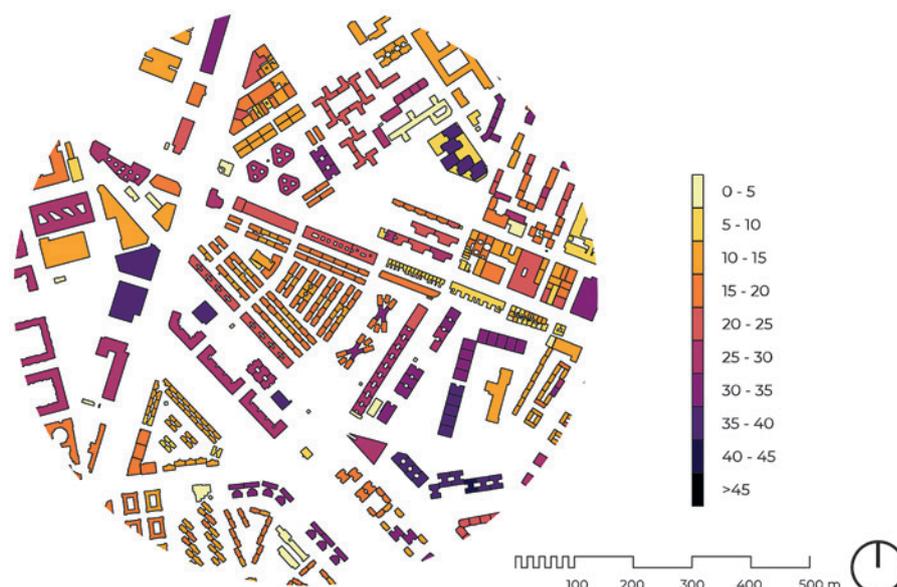


Figura 5.9. Planimetría de la edificación del entorno de la barriada de El Plantinar por alturas de construcción. Datos del catastro, 2021. Julia Díaz-Borrego

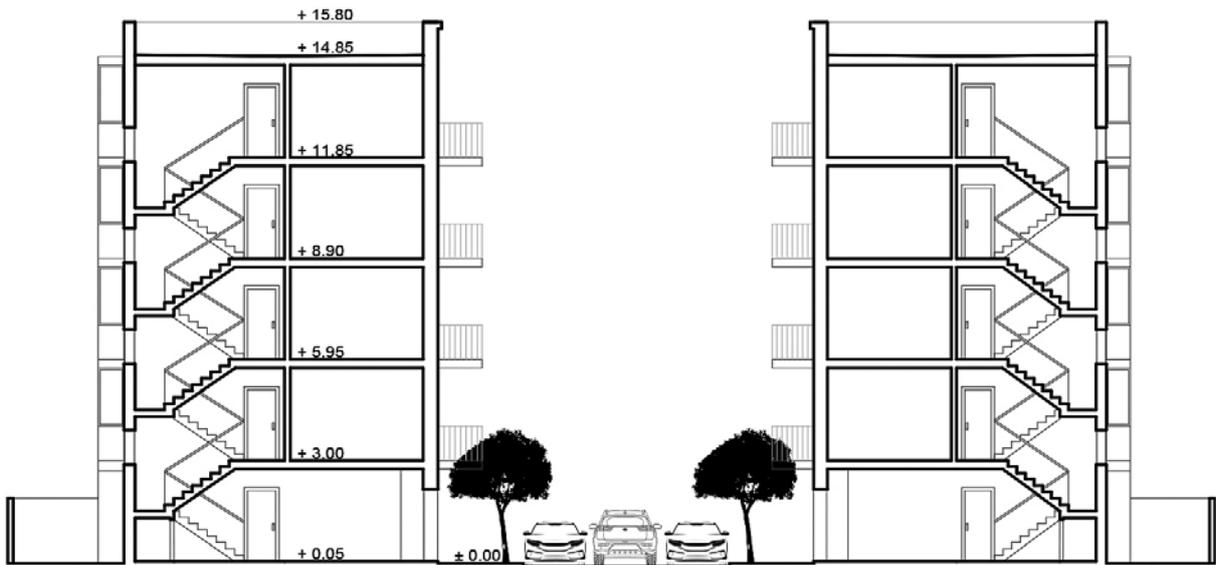


Figura 5.10. Sección genérica detallada del viario actual de la barriada de El Plantinar. Julia Díaz-Borrego

responde, según investigaciones anteriores, a una proporción óptima. Dicha proporción beneficia el acceso solar en las viviendas y oficinas con fachada a dicho vial, al tiempo que controla, gracias al sombreado propio de la edificación, las temperaturas exteriores en las estaciones cálidas.

Sección del viario: análisis espacio público

Como se mencionó anteriormente, la abundante presencia del vehículo privado en las estrechas calles del conjunto residencial caracteriza el paisaje urbano de la barriada. Dicha presencia obstaculiza los recorridos peatonales, relegando a los viandantes a las, en ocasiones, no suficientemente anchas aceras (figura 5.11). Además, la presencia del vehículo rodado en las estrechas calles de la barriada no solo supone una fuente de contaminación acústica y ambiental, sino que también agrava el efecto de isla de calor urbano, aumentando las temperaturas nocturnas.

Así, la modificación en la sección del viario, tendiendo hacia un diseño más homogéneo entre acera y calzada, en la que se prime la presencia del peatón frente la del vehículo rodado, podría suponer una excepcional transformación social y ambiental. Asimismo, una mayor presencia y diversidad de vegetación enriquecería, no solo las características ambientales, sino también los valores urbanos y arquitectónicos del conjunto.

5.3.2. Análisis desde la escala del objeto

Es importante iniciar esta aproximación al objeto haciendo una breve referencia a la tipología de los polígonos residenciales llevados a cabo por el Instituto Nacional de Vivienda, los cuales respondían a lo que se podría denominar arquitectura de necesidad. Regido por la racionalidad y los principios de funcionalismo y el ahorro, prima, en teoría, aspectos de salubridad (saneamientos, protección de humos y gases, ventilación, soleamiento, aislamiento térmico y protección contra incendios) y estipula, entre otras medidas, que todas las estancias deben contar con luz



Figura 5.11. Fotografías del estado actual del viario y los espacios libres de la barriada de El Plantinar, 2022.
Julia Díaz-Borrego

natural directa. Asimismo, realizaron estudios tipológicos, en los que se determinaba la vivienda familiar tipo con tres dormitorios, cocina-comedor y baño. Así, en el conjunto residencial, solo un máximo del 40% de las viviendas podían tener un programa reducido y un mínimo del 10% debían tener cuatro o más dormitorios. Por su parte, en consonancia con los principios mencionados, quedaba prohibido cualquier elemento ornamental y, en general, todo lo que no tuviera una finalidad funcional y encareciese innecesariamente la construcción (Guajardo-Fajardo, 2018; Pareja López y Peña Fernández, 1994; Adell y Cano, 2008).

Se establecieron también unas superficies mínimas para los espacios de las viviendas. En todas debía haber una estancia principal con una superficie mínima de 14 m². Las cocinas independientes tendrían 6 metros cuadrados si contaban con lavadero y 4 si lo tenían aparte. Los dormitorios debían tener una superficie mínima de 6 m² y los retretes de uno. Por su parte, las alturas libres mínimas y máximas se estipulaban en 2,50 y 3 metros, respectivamente; el ancho de los pasillos debía ser, al menos, de 0,80 metros, no obstante, estos no eran habituales en los bloques lineales debido a las limitadas superficies habitacionales dictadas por las normativas (Guajardo-Fajardo, 2018).

La tipología dominante de las viviendas protegidas en las décadas de los 50 fue el bloque lineal de doble crujía, núcleo de escaleras y dos viviendas por planta. Esta tipología conseguía, con la doble fachada, óptimas condiciones de soleamiento y ventilación. Las alturas predominantes para esta tipología fueron de planta baja más cuatro, no disponiendo de ascensor. Por su parte, a

finales de los 50, buscando una mayor rentabilidad económica y del suelo, se promueven en mayor medida los edificios en altura (10 plantas) dotados de ascensor y cuatro viviendas por planta.

Estas dos tipologías serían la base de las ordenaciones de los Polígonos del INV en los que dominaban las edificaciones abiertas y la combinación de torres con pastillas de 4 o 5 plantas de altura, quedando las calles como espacios residuales sin una estructura urbana clara y con una imagen de ciudad disgregada.

(Pareja López y Peña Fernández, 1994)

El objeto de estudio que nos atañe se encuentra definido dentro de la tipología de bloque lineal. Por tanto, se focalizará el análisis en dicha tipología edificatoria.

En cuanto al sistema estructural, parece existir una singular tendencia a incorporar estructuras de pórticos de hormigón armado frente a las de tipo mixto o de muros en este tipo de bloques.

Según la clasificación de viviendas estipulada por Alfonso Guajardo en su tesis doctoral (Guajardo-Fajardo, 2018), se diferencian tres tipos según la relación existente entre la zona de día (estar-cocina) y la zona de noche (dormitorios) de la vivienda, siendo la definición de los tres tipos los que se presentan a continuación:

Tipo 1

Aquel en el que existe una dependencia entre la zona diurna y nocturna, es decir, para acceder a la zona de noche desde la entrada hay que atravesar las estancias diurnas.

La distribución característica de este tipo es aquella que responde al siguiente esquema: entrada con ingreso directo al salón. Desde este se accede a la cocina, que se posiciona a continuación del núcleo de escalera, y a los dormitorios, que se organizan en torno a un pequeño distribuidor. El baño se localiza en medianera, entre dos dormitorios.

(Guajardo-Fajardo, 2018)

Tipo 2

Aquel donde existe independencia entre la zona de noche y la diurna.

La distribución característica es aquella que establece una división funcional por crujías. En una se ubicará la zona de noche (dormitorios) y en la otra, la de día (estar y cocina). El acceso se produce en el punto medio de uno de los lados cortos de la vivienda. Un pequeño vestíbulo de entrada precede a un pasillo que registra todo el espacio por su zona media y acaba integrándose en el estar. El aseo y la cocina se localizan cercanos a la caja de escalera, formando el núcleo húmedo de la vivienda.

(Guajardo-Fajardo, 2018)

Tipo 3

Aquel en la que la zona de noche está disociada, es decir, existe una dependencia de acceso entre el estar-cocina y algunos dormitorios, pero con otros no.

La distribución característica de este tipo es la que responde al siguiente esquema: el acceso se produce por la zona media de la vivienda. Un pequeño vestíbulo de acceso permite la entrada directa a un dormitorio

y al único aseo de la vivienda. La cocina se dispone anexa al aseo formando el núcleo húmedo. [En contextos de economías muy reducidas, la solución de situar contiguos el baño y la cocina es, ante todo, una medida de ahorro económico y de simplificación de la construcción.] Enfrentado a la cocina se ubica el estar, que desagrega la zona de noche y funciona como espacio distribuidor. Al fondo, en la medianera, se posicionan dos dormitorios. [...] Viviendas de mayor profundidad pueden incorporar un pasillo que asume las funciones de distribuidor y permite formalizar el salón.

(Guajardo-Fajardo, 2018)

Se trata de la distribución más habitual en la década de los 50, sin embargo, posteriormente su uso fue en detrimento. La reducida superficie media de este tipo de vivienda la hace característica de programas de baja categoría y economías muy reducidas. Por tanto, cuando se comienza a apostar por mejores prestaciones habitacionales, las distribuciones que responden al Tipo 3 dejan de ser las más empleadas.

Análisis tipológico de bloques de El Plantinar

El conjunto residencial que conforma la barriada de El Plantinar es un proyecto de 846 viviendas enmarcado en el régimen de Vivienda de Renta Limitada. Dicho régimen formaba parte del Plan Nacional de Vivienda, desarrollado por el Instituto Nacional de Vivienda a lo largo de la década de los 50 con la finalidad de unificar, a escala nacional, toda intervención de vivienda pública en una única Ley (Guajardo-Fajardo, 2018). Por tanto, arquitectónicamente responde al racionalismo y funcionalismo del INV, pero sin dejar de lado la retórica vernácula (Adell y Cano, 2008).

La barriada de El Plantinar es un proyecto de los arquitectos Antonio Delgado Roig y Alberto Balbontín de Orta, en colaboración con Publio y Pedro Fernández de Heredia; llevado a cabo en la década de los 60 (proyectado en 1960 y ejecutado en 1964). Ambos arquitectos fueron partícipes del desarrollo de múltiples proyectos de viviendas colectivas y barriadas en Sevilla, entre las que se encuentran la barriada «El Tardón», barriada de la Candelaria y la barriada «El Juncal». Frente a barriadas desarrolladas por dichos arquitectos con posterioridad, la ordenación, arquitectura austera y alta densidad características de El Plantinar, responden a una primera fase «desarrollista» y «posibilista», en la que las viviendas de protección se regían por principios constructivos propios de la arquitectura de necesidad (Adell y Cano, 2008).

El Plantinar es el fruto de una ordenación de conjunto compuesta por sucesivas pastillas de bloques, en la que la formalización del viario y del espacio público es producto del «vacío» resultante de la composición lineal de los bloques (figura 5.12). Dicha composición conforma a su vez espacios libres dentro de los bloques, que permiten la doble ventilación de las viviendas, y confieren a las viviendas de planta baja patios privados traseros. Dicha formalización del conjunto responde, a su vez, a la trama urbana y a la forma del sector en punta de flecha. La barriada se organiza así en torno a una plaza central dotada con, el que sería, el edificio destacado y notable de la barriada, actualmente: la iglesia.

La conformación de los bloques responde a la tipología de vivienda protegida dominante en la década de los 50: bloques lineales de planta baja más cuatro, de doble crujía, núcleo de escaleras –sin ascensor– y dos viviendas por planta.



Figura 5.12. Fotografía aérea de área de la barriada de El Plantinar y su entorno urbano, 2008. Vuelos Históricos de Sevilla, Gerencia de Urbanismo. Julia Díaz-Borrego

Cabe destacar lo inusual del uso del bloque lineal de baja densidad para la conformación completa de toda una barriada ya pasada la década de los 60, por su baja rentabilidad económica y de uso del suelo, en comparación con la edificación en altura. Asimismo, la solución estructural de los bloques de El Plantinar (estructura mixta) va en consonancia con la comúnmente empleada en los bloques de vivienda protegida de la década de los 50, y es poco usual en las barriadas coetáneas de la ciudad de Sevilla, lo que lo convierte en un conjunto de singular interés.

El conjunto se compone de 13 bloques de viviendas edificados en una única fase de ejecución. Dentro de los bloques se diferencian tres tipologías de vivienda: un tipo de vivienda pequeña, otro mediana (ambos de tres dormitorios) y un último tipo de mayor tamaño que cuenta con cuatro dormitorios.

El proyecto construido responde de manera fidedigna al original (figura 5.13, figura 5.14), tanto en la ordenación urbana como en las tipologías habitacionales y su disposición. Sin embargo, el proyecto original planteaba en la zona central del conjunto la edificación de un rascacielos como elemento destacado (hito). En su lugar se acabaría construyendo la parroquia de San Diego de Alcalá en 1971, que hoy día alberga la Hermandad Procesional del Sol. Sin duda dicha parroquia ha logrado el objetivo final del planeamiento original, ser un elemento central de la barriada, el hito alrededor del cual se organiza, tanto física como socialmente, la barriada. Esta modificación respecto al proyecto original le confiere al conjunto una relación espacial más equilibrada tanto en términos meramente físicos y estructurales (urbanos), como de eficiencia ambiental (soleamiento, ventilación urbana, densidad urbana, contaminación visual, ruido, etc.), logrando así que dicha plaza central sea lugar de encuentro de los vecinos y uno de los espacios urbanos con mayor calidad espacial y ambiental de la barriada.

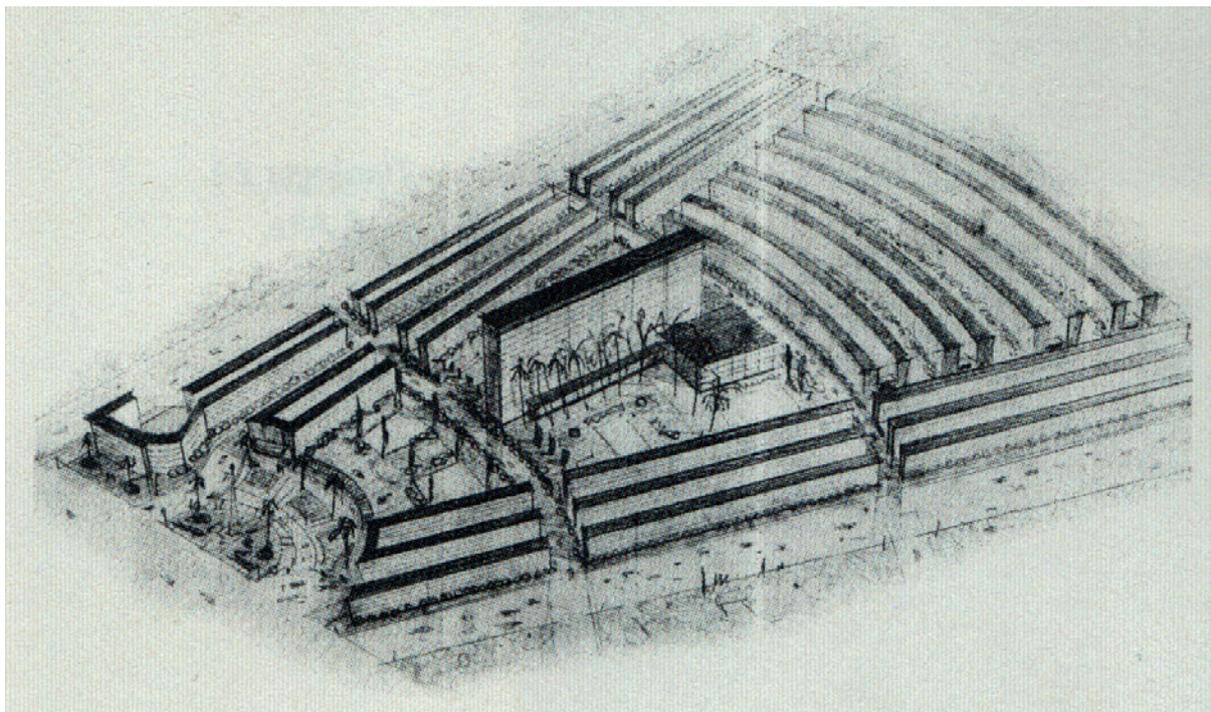


Figura 5.13. Planimetría proyecto original de la barriada de El Plantinar, 1960, A. Delgado Roig y A. Balbontín de Orta ICAS-SAHP, Archivo Municipal de Sevilla, n.º 60392

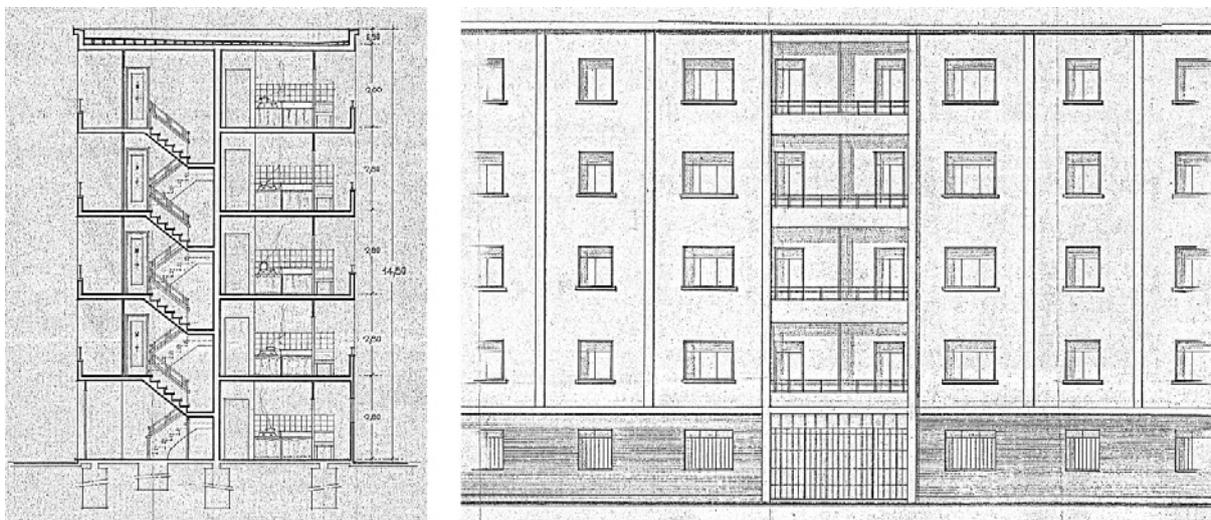


Figura 5.14. Planimetría proyecto original de la barriada de El Plantinar, 1960, A. Delgado Roig y A. Balbontín de Orta ICAS-SAHP, Archivo Municipal de Sevilla, n.º 60392

Análisis tipológico de la vivienda de El Plantinar

Como ya se ha mencionado en la barriada se diferencian tres tipos de viviendas (pequeñas [3a, 3c], medianas [3b, 3d] y grandes [2a, 2b]); asimismo, de cada tipo de viviendas existen dos variantes, la que podría denominarse vivienda tipo y su variante para planta baja (figura 5.15).

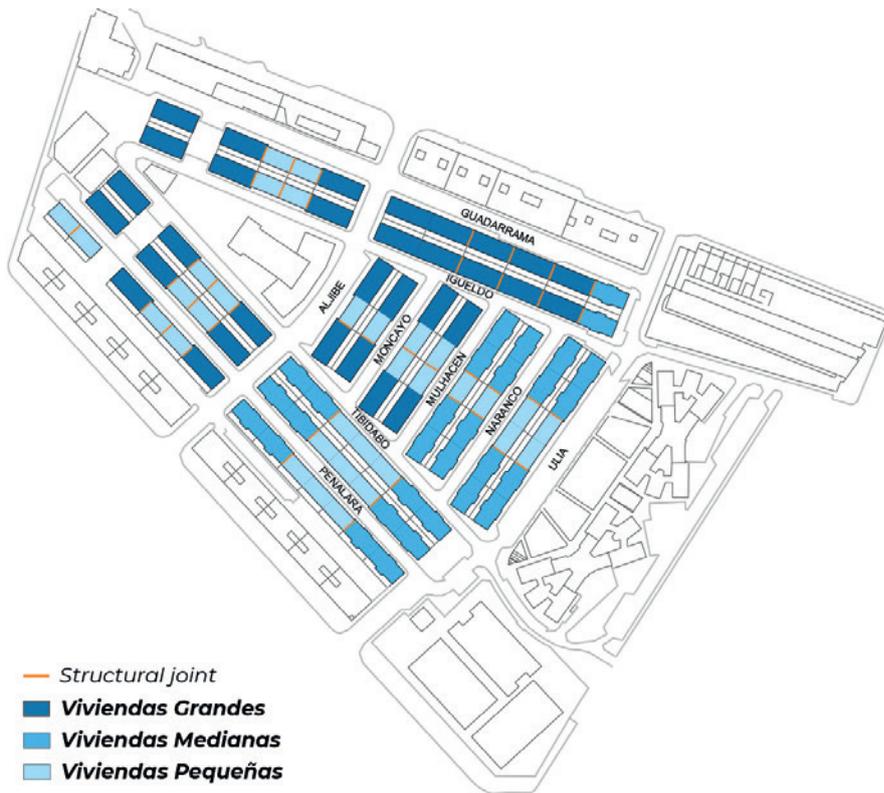


Figura 5.15. Ordenación actual del conjunto residencial El Plantinar. Diferenciación de bloques según tipología de vivienda. Julia Díaz-Borrego

Viviendas pequeñas

El tipo de «vivienda pequeña» (figura 5.16) responde al Tipo 3, según la clasificación de Alfonso Guajardo (Guajardo-Fajardo, 2018), siendo una variante del caso genérico ya definido. La variación llevada a cabo en este tipo de vivienda conlleva una mejora en la circulación de la misma respecto al caso genérico. Esta mejora consiste en el intercambio de posición de uno de los dormitorios y el núcleo húmedo. Ubicando el baño al fondo en lugar de a la entrada de la vivienda, se logra un mejor acceso al tercer dormitorio a través de un pequeño vestíbulo.



Figura 5.16. Tipología de vivienda «pequeña» de El Plantinar con superficies y distribuciones. Julia Díaz-Borrego

Se trata de una vivienda con una superficie útil muy limitada en la que todas las estancias tienen un tamaño excesivamente reducido, en relación con los estándares habitacionales actuales.

Viviendas medianas

El tipo de «vivienda mediana» (figura 5.17) responde la distribución característica del Tipo 1, siendo un ejemplo manifiesto del tipo genérico. Se trata de una vivienda con una superficie también muy limitada. La distribución de la vivienda permite el ahorro máximo de superficie útil en detrimento de la funcionalidad de la misma. Esta disfuncionalidad en la distribución se manifiesta en el inadecuado empleo de la estancia principal como espacio distribuidor de la vivienda, provocando que la escueta superficie útil de dicha estancia quede además reducida por la zona de paso entre las estancias diurnas y nocturnas de la vivienda.



Figura 5.17. Tipología de vivienda «mediana» de El Plantinar con superficies y distribuciones.
Julia Díaz-Borrego

Viviendas de mayor tamaño

El tipo de «vivienda grande» (figura 5.18) se trata de una variante del caso genérico del Tipo 3, definido anteriormente, que cuenta con cuatro dormitorios. Su anchura permite disponer un pasillo central distribuidor, evitando así que el estar desempeñe la función organizativa. La cocina se sitúa en la medianera como final de pasillo. Esta posición libera a la vivienda de los problemas distributivos generados por la coexistencia del pasillo y el doble dormitorio medianero. Junto a ella se dispone una pequeña terraza lavadero al exterior, un aseo y un baño completo (núcleo húmedo). Por lo demás, el dormitorio principal queda ubicado al fondo, próximo a los aseos y el resto de dormitorios quedan ubicados próximos al acceso a la vivienda.

Este tipo de vivienda cuenta con una superficie más aceptable que las anteriores debido, no obstante, a la introducción de un cuarto dormitorio.



Figura 5.18. Tipología de vivienda «grande» de El Plantinar con superficies y distribuciones.
Julia Díaz-Borrego

Transformaciones

Por lo general, el conjunto vecinal no ha sufrido remarcables transformaciones (figura 5.19). Pese a la ya analizada obsolescencia tipológica de la edificación, pocas han sido las transformaciones llevadas a cabo en la barriada. Destacan las transformaciones de carácter funcional, como la introducción de ascensores en algunos de los bloques de viviendas, la apertura de huecos en paramentos originariamente opacos, introducción de protecciones solares y rejas en ventanas, así como el cierre de balcones como extensión del espacio de estancia o, en ocasiones, transformándolos en pequeños lavaderos. Por su parte, son detectadas otras transformaciones de carácter estético, como la modificación estética y material de los zócalos (fachadas de planta baja) así como de las puertas de acceso a los bloques.

Desencuentros entre las tipologías de El Plantinar y el habitar contemporáneo

Evolución social

Los últimos datos del padrón (figura 5.20, figura 5.21) reflejan la disminución de población residente que está sufriendo el barrio en los últimos años. Esta tendencia responde a una serie de circunstancias relacionadas entre sí. La primera de ellas es el perfil del habitante «original» del barrio: personas de avanzada edad. La generación que se trasladó y asentó en el barrio ha envejecido y sigue residiendo, en gran medida, en las mismas viviendas. Así, el envejecimiento de la población residente supone el aumento de bajas por defunción.



Figura 5.19. Fotografías del estado actual de la barriada de El Plantinar: análisis de transformaciones y estado de conservación, 2022. Julia Díaz-Borrego

Por su parte, el intercambio generacional tiende a emigrar a otras zonas de la ciudad, señal de la obsolescencia que sufre la barriada, que no ha sido capaz de evolucionar y adaptarse a los nuevos modos de habitar. Esto no solo supone la emigración de las generaciones más jóvenes, sino que tampoco atrae a nuevos residentes.

Asimismo, la envejecida población originaria debe cohabitar con el nuevo residente temporal: los estudiantes. La proximidad entre la barriada y el campus universitario de Viapol, sumado

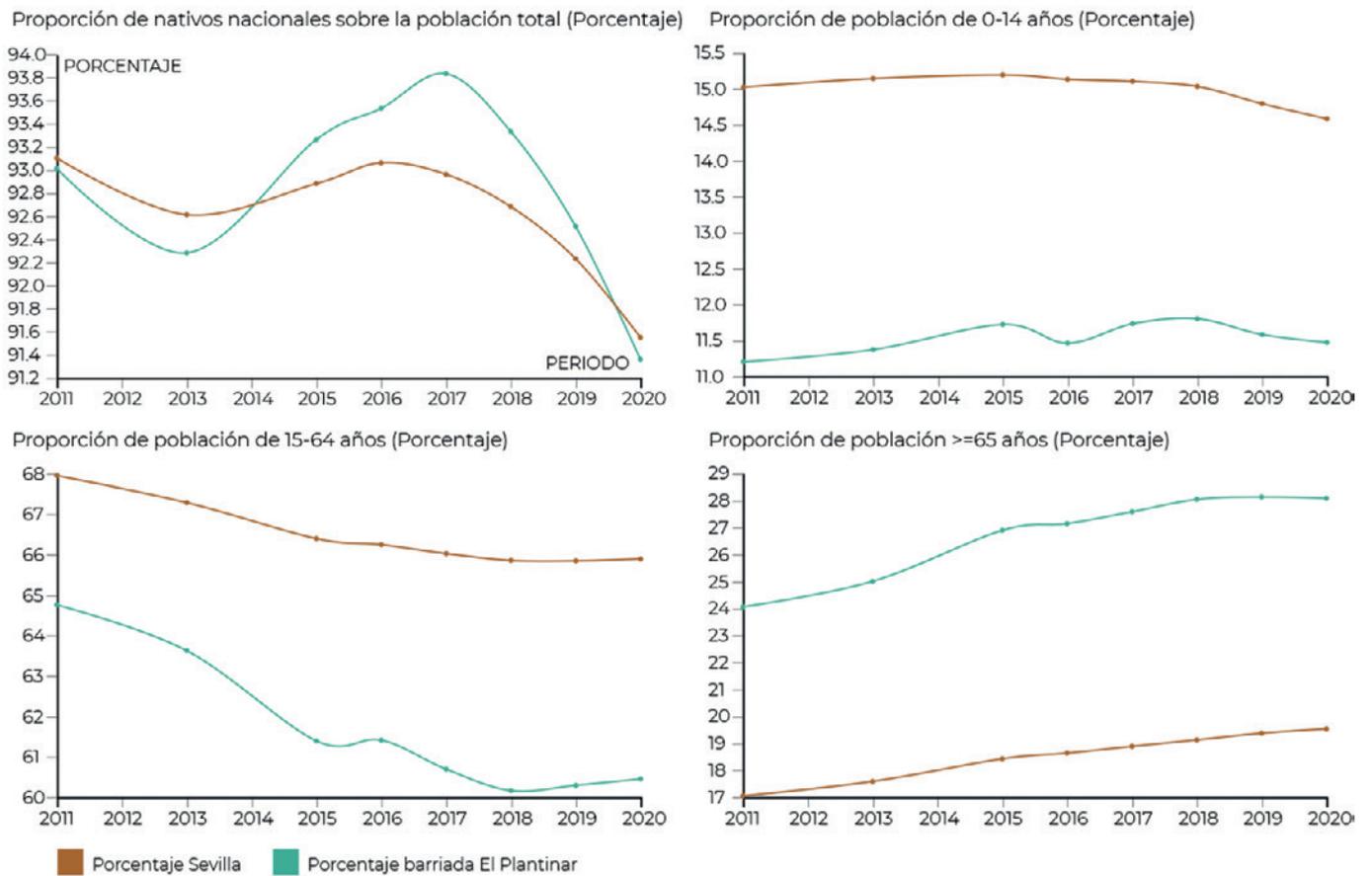


Figura 5.20. Evolución migratoria de El Plantinar en el período 2011-2020. Datos del padrón (www.sevilla.org).
Julia Díaz-Borrego

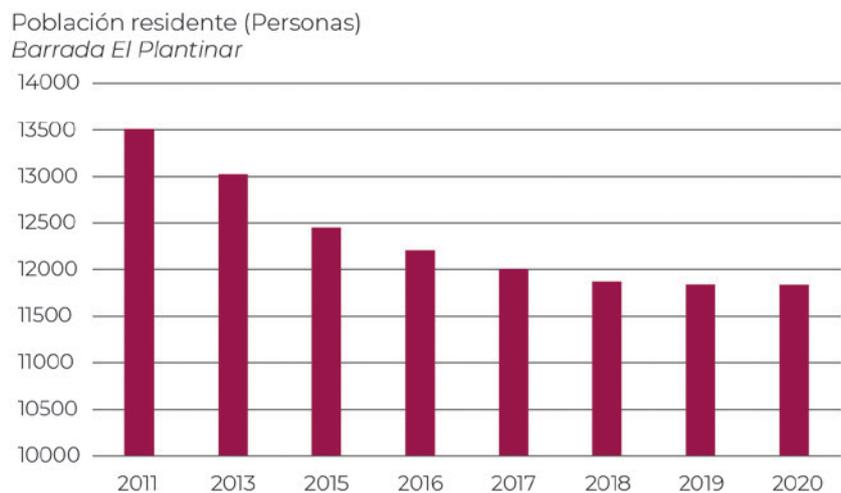


Figura 5.21. Evolución migratoria de El Plantinar en el período 2011-2020. Datos del padrón (www.sevilla.org).
Julia Díaz-Borrego

Sanz pide un plan para El Plantinar, en Sevilla, para "atajar" el vandalismo y las fiestas en pisos de estudiantes



El candidato del PP a la Alcaldía de Sevilla, José Luis Sanz, en el barrio del Plantinar. - PP SEVILLA, 1 Feb. (EUROPA PRESS) -

Figura 5.22. Titular periódico alerta sobre conflictos sociales en El Plantinar. Sevilla, 01/02/22 (EUROPA PRESS)

al contraste entre la calidad habitacional de El Plantinar y los barrios de su entorno (que se refleja en la diferencia económica entre los altos precios de los alquileres del entorno y el económico precio de los alquileres de El Plantinar), hacen de las viviendas de la barriada la unidad de habitación perfecta para los estudiantes.

El conflicto, o tensión, fruto del contrastado estilo de vida entre los residentes habituales y los estudiantes, se hace latente en la vida cotidiana (figura 5.22).

Dimensión

Del mismo modo que en los polígonos residenciales del INV se estipulaban unos estándares mínimos de habitabilidad (superficies mínimas, altura libre, ancho pasillos), en la actualidad, la vivienda social debe satisfacer unos estándares mínimos, adaptados a las necesidades y requerimientos del habitar contemporáneo.

Estos vienen definidos, entre otros, por ordenanzas que estipulan las superficies mínimas de las estancias. Tomando como valor de referencia las dictadas por la normativa de vivienda social vigente en Andalucía para una vivienda de tres dormitorios, se analiza el grado de obsolescencia de las viviendas de la barriada de El Plantinar en cuanto a sus dimensiones (tabla 5.1).

En relación con los estándares actuales, llama la atención como las tres tipologías de vivienda cuentan con estancias cuyas dimensiones se encuentran muy por debajo de las estipuladas en la normativa vigente. Son especialmente alarmantes las dimensiones de los espacios de Estar-Comedor y el de los Dormitorios Secundarios. Asimismo, la tipología de vivienda pequeña será, con toda seguridad, la que suponga el mayor desafío a la hora de llevar a cabo una adaptación tipológica para el habitar contemporáneo.

Tabla 5.1. Tabla comparativa de superficies mínimas según normativa de vivienda social vigente en Andalucía para vivienda de 3 dormitorios y superficies de las diferentes tipologías de vivienda de El Plantinar. Julia Díaz-Borrego

	Estar-Comedor	Dormitorio Principal	Dormitorios Secundarios	Cocina independiente	Baño
Andalucía	18 m ²	12 m ²	8 m ²	7 m ²	Sin especificar
Tipologías El Plantinar	Estar-Comedor	Dormitorio Principal	Dormitorios Secundarios	Cocina independiente	Baño
Vivienda pequeña	9,3 m ²	9,5 m ²	5,4 m ² 6,0 m ²	4,4 m ²	2,2 m ²
Vivienda mediana	12,3 m ²	12,0 m ²	8,3 m ² 8,6 m ²	7,0 m ²	3,2 m ²
Vivienda grande	15,3 m ²	12,9 m ²	5,2 m ² 6,9 m ² 10,8 m ²	7,0 m ²	5,2 m ²

Género

A estos problemas de dimensión hay que sumarle la baja calidad de las estancias que han sido asociadas tradicionalmente a las mujeres. El sexismo y machismo de la sociedad española de mediados del siglo XX se hacía patente, principalmente, en el ámbito doméstico. El cuidado del hogar y los hijos han sido tareas históricamente asociadas a las mujeres. La dimensión, calidad y situación en la distribución de la vivienda de los espacios asociados a dichas tareas (preparación de alimentos, limpieza del hogar o la ropa) solían ser inferiores y marginales.

Es esencial, por tanto, el análisis de la dimensión, calidad espacial y grado de aislamiento de cocinas y lavaderos en este tipo de viviendas.

Accesibilidad

En relación con la dimensión de las estancias en la vivienda, la accesibilidad es otro factor indispensable a tener en cuenta para satisfacer los estándares mínimos de habitabilidad. Esta necesidad es aún mayor en barriadas envejecidas como es la de El Plantinar, en la que una alta proporción de su población supera los 65 años de edad (figura 5.23).

Para ello, es necesario analizar el ancho y dimensión de los espacios, tanto de la vivienda como del bloque. Estos deben asegurar la accesibilidad de sus moradores.

En relación a los bloques, en El Plantinar destaca la falta de ascensores, esenciales para asegurar la accesibilidad de las personas con problemas de movilidad. Esto ha supuesto la necesaria transformación de los bloques para su posterior introducción o, en su defecto, el traslado de esta población de su vivienda original a las de planta baja.

Asimismo, para dar respuesta a las necesidades habitacionales de las personas de la tercera edad y de sus cuidadores, la distribución, mobiliario y dimensión de espacios como la estancia principal, dormitorio y baño, son esenciales.

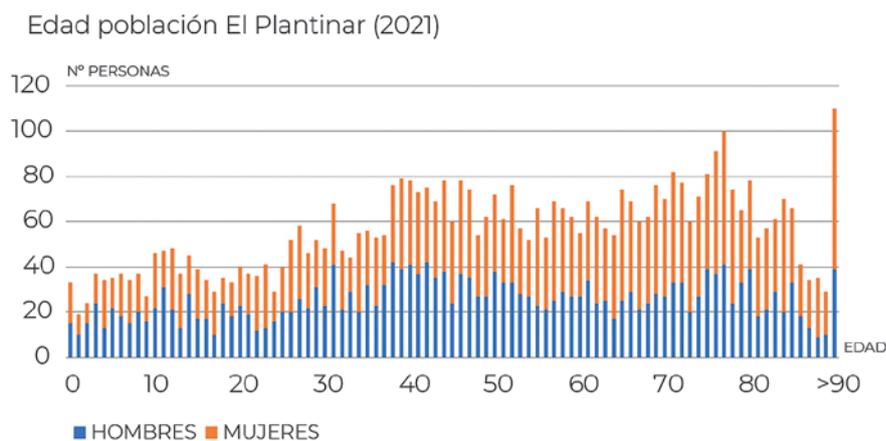


Figura 5.23. Edad población residente en El Plantinar (2021). INE, urban audit 2021. Julia Díaz-Borrego

Programa

Un estudio realizado en 1950 del «Censo de Edificios y Viviendas» señalaba que la composición media familiar en España era de 4,5 personas. Hoy en día, el tamaño medio de las familias en nuestro país ha disminuido drásticamente (figura 5.24). Esta reducción progresiva cuestiona la viabilidad de los programas de viviendas de las décadas de los 50 y 60, como las de El Plantinar, sobre todo en las viviendas con tres y cuatro dormitorios.

Por su parte, la evolución que ha sufrido la composición de los núcleos familiares queda marcada también por la diversidad de estándares habitacionales que encontramos en la actualidad, frente a la homogeneidad del núcleo familiar tradicional que regía en el estándar habitacional de los 60.

No se debería caer, no obstante, en la simplificación de considerar que la reducción del tamaño medio de la familia está indefectiblemente asociada a una aceptación de programas reducidos. Por el contrario, parece comprobarse que el aumento de estándares habitacionales experimentado en las últimas décadas ha hecho elevar la exigencia de la población sobre las prestaciones espaciales de las viviendas.

(Guajardo-Fajardo, 2018)

Así, la homogeneidad de los tipos de viviendas que encontramos en El Plantinar entra en conflicto con la diversidad existente actualmente en la composición de los hogares.

Hoy un barrio atractivo es aquel que, gracias a su diversidad, responde a un amplio espectro de población ofreciendo diferentes posibilidades habitacionales. La vivienda de los polígonos queda lejos de este ideal. Es esta otra de las razones de la obsolescencia de sus tipologías.

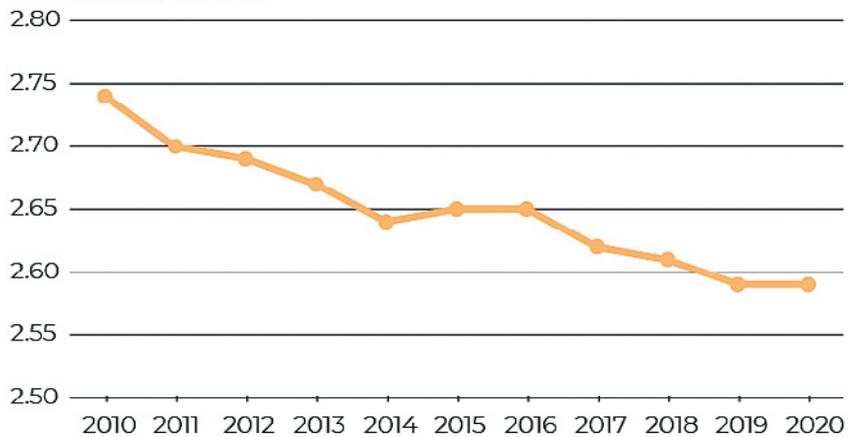
(Guajardo-Fajardo, 2018)

Flexibilidad: ambigüedad e hibridación de usos

En la actualidad, la vivienda debe responder a la diversidad en la composición de los hogares. La distribución, flexibilidad y espacialidad de la misma debe dar lugar a diferentes posibilidades habitacionales.

La distribución de las viviendas de El Plantinar responde al funcionalismo y racionalismo más estricto.

Tamaño medio de los hogares (Número de personas)
Barrada El Plantinar



Cantidad núcleos familiares según nº de personas que lo componen
Barrada El Plantinar, 2021

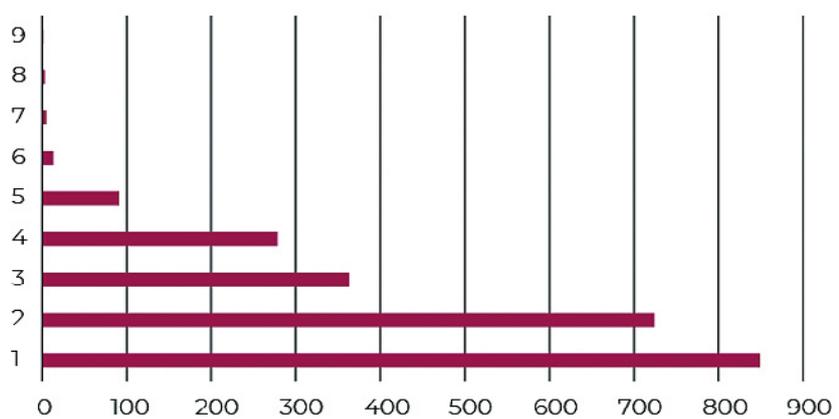


Figura 5.24. Evolución tamaño medio de los hogares en El Plantinar en el período 2010-2020 (INE, urban audit 2021). Tamaño y composición de los núcleos familiares de El Plantinar (2021). Datos del padrón (www.sevilla.org).
Julia Díaz-Borrego

Funcionalismo y ambigüedad son dos conceptos poco compatibles en la arquitectura residencial. El primero apuesta por la separación y especialización de las funciones dentro de la vivienda; el segundo por su indeterminación funcional.

(Guajardo-Fajardo, 2018)

Como cita Alfonso Guajardo (Guajardo-Fajardo, 2018) algunos de los requisitos que debe cumplir una vivienda para ser flexible son:

- La homogeneización de los espacios sin una jerarquía definida: similares en dimensión, forma y equipamientos.
- Distribución flexible de los espacios: flexibilidad en la delimitación de los mismos mediante elementos móviles y renunciando, en la medida de lo posible, a los pasillos convencionales de distribución.

Por su parte, la realidad contemporánea (tele-trabajo) ha evidenciado la incapacidad de adaptación de nuestras viviendas a la hibridación de usos.

Así, las tipologías de viviendas de los polígonos residenciales del Plan Nacional de Vivienda no parecen ser compatibles con la flexibilidad e hibridación de usos necesaria para dar cabida a

las diversas realidades habitacionales actuales, siendo necesaria una transformación tipológica de las mismas para su adaptación al habitar contemporáneo.

5.3.3. Análisis desde la escala perceptiva

La percepción ciudadana es un dato fundamental para contrastar la aproximación realizada por los técnicos a la hora de concluir la caracterización patrimonial. Esta información se obtiene a partir de una serie de entrevistas que se realizaron a la comunidad, en concreto a 52 miembros (que representaría al 0.5 % de la población de la barriada).

Las preguntas que se realizaron fueron las siguientes: 1) Qué es lo que más te gusta de tu barrio, 2) qué aspectos mejorarías, 3) qué eliminarías. En relación a la primera pregunta el 90 % de las respuestas hacen referencia al sentimiento de barrio, a las buenas relaciones entre los vecinos, a la buena conexión con el resto de la ciudad a través del transporte público, a la vida tranquila y al hecho de tener espacios públicos cerca. Nadie menciona su vivienda. En relación a las cuestiones de mejoría, un 77 % de los vecinos hace referencia a la necesidad de más espacio en sus viviendas, la ausencia de entradas de luz, las altas temperaturas en verano y la dificultad para acceder (no todos tienen ascensor), mientras que un 23 % menciona la necesidad de aumentar el servicio de limpieza debido a la suciedad en el barrio, el aumento de inseguridad y la necesidad de más árboles. Por último, en relación a la pregunta de qué eliminarías, la mayoría (un 94 %) dicen que nada, que su barrio les gusta tal y como está, mientras que un 6 % hacen referencia a las barreras arquitectónicas e insisten en la necesidad de eliminarlas para lograr una plena inclusión y accesibilidad en el barrio.

5.4. CONSIDERACIONES FINALES

Los distintos análisis desarrollados en el ámbito de estudio revelan claramente la obsolescencia del proyecto de la vivienda moderna en relación a las necesidades de los distintos usuarios de la vivienda del siglo XXI. La obsolescencia tipológica se enfrenta a los modos de vida actuales y a unas necesidades imperantes de mejora del confort y la habitabilidad en términos de aislamiento térmico y energético. Asimismo se han esbozado dificultades relacionadas con la accesibilidad, la habitabilidad mínima (heredera del proyecto moderno), la rigidez del programa y la diversificación de habitantes. Pero frente a la obsolescencia tipológica, es importante reconocer aquellos valores patrimoniales que van de la mano de la cuestión urbana, esto es: la ubicación de la barriada en relación a la ciudad, la calidad espacial de sus calles, la escala de la edificación en relación al usuario, la relación entre los vecinos, el uso del comercio de proximidad e incluso cuestiones de identidad (las más vulnerables). Asimismo, de este recorrido se extrae el valor vinculado al diseño de la nueva ciudad vinculada con la modernidad, erigiéndose como un símbolo de progreso que permitía a todas las clases sociales ubicarse en la ciudad. Probablemente las cuestiones materiales, constructivas y estructurales han quedado obsoletas, pero otras cuestiones, como las conceptuales, el urbanismo, lo social o lo medioambiental, adquieren una dimensión significativa para poder comprender el valor y la importancia del proyecto moderno.

Con la información obtenida el siguiente paso es identificar con detenimiento los valores y atributos culturales que definen la singularidad de esta barriada, y lo más importante, la definición de unos criterios de intervención que permitan una actualización de la tipología de vivienda, pero que al mismo tiempo respete la identidad de la ciudadanía y su integración en el paisaje urbano histórico de la ciudad de Sevilla.

De este panorama actual se extraen tres cuestiones significativas en las que se fundamenta esta investigación: a) la importancia de estudiar el patrimonio contemporáneo para evitar su pérdida y destrucción, b) la necesidad de prestar especial atención a las barriadas y a la vivienda de la época moderna dada la escasez de los ejemplos estudiados en este ámbito y, por último, c) la importancia de desarrollar una labores de documentación amplias y rigurosas que aseguren los futuros procesos de investigación, protección, conservación y difusión de cualquier tipo de patrimonio, así como la puesta en marcha de políticas efectivas de protección. Por todo lo que significa e implica, el Movimiento Moderno desde el punto de vista artístico, histórico, cultural, estético, constructivo, social, metodológico y conceptual, constituye un patrimonio con una serie de valores que protegerse desde el presente. En este panorama disperso, y aun corriendo el riesgo de diluirse, se ubican las barriadas y las viviendas del siglo XX, consideradas como una pieza fundamental en la construcción del paisaje urbano moderno.

5.5. REFERENCIAS

- Adell, E. M. y Cano, M. T. P. (2008): Sevilla y la obra arquitectónica de Alberto Balbontín y Antonio Delgado Roig. In *Alberto Balbontín de Orta (1903-1972). Arquitecto y director fundador de la ETSA: enero-febrero 2005 [Escuela de Arquitectura de Sevilla]* (pp. 105-122). Colegio Oficial de Arquitectos de Sevilla.
- Aguilar-Carrasco, M. T., Domínguez-Amarillo, S., Acosta, I. y Sendra, J. J. (2021): «Indoor lighting design for healthier workplaces: natural and electric light assessment for suitable circadian stimulus». *Optics Express*, 29(19), 29899-29917. <https://doi.org/10.1364/OE.430747>
- Almuedo Palma, J. (1994): *Ciudad e industria: Sevilla 1850-1930* (Tesis Doctoral, Universidad de Sevilla).
- Bandarin, F. (2003): «Foreword». En R. Van Oers y S. Haraguchi (Eds.), *World Heritage Papers n° 5 – Identification and Documentation of Modern Heritage* (p. 4). UNESCO – World Heritage Centre. http://whc.unesco.org/documents/publi_wh_papers_05_en.pdf
- Council of Europe (1991): *Recommendation No. R (91) 13 of the committee of ministers to member states on the protection of the twentieth-century architectural heritage*. <https://wcd.coe.int/com.instranet.InstraServlet?command=com.instranet.CmdBlobGet&InstranetImage=572353&SecMode=1&DocId=597874&Usage=2>
- Díaz-Borrego, J., Acosta, I., Campano, M. Á. y Amarillo, S. D. (2021): «Urban layout for building solar optimization and outdoor comfort balance: neighborhood strategy in Mediterranean climate». *The Journal of Engineering Research [TJER]*, 18(2), 114-123. <https://doi.org/10.53540/TJER.VOL18ISS2PP114-123>
- Gómez Villa, J. L. (coord.) (2019): *re-HABITAR el Carmen Un proyecto sobre patrimonio contemporáneo*. Junta de Andalucía, Consejería de Cultura y Patrimonio Histórico. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/libro?codigo=769253>
- Guajardo-Fajardo, A. (2018): *Obsolescencia y hábitat: la cuestión tipológica en la regeneración de los polígonos residenciales en España (1950-1980)*. [Universidad de Sevilla]. <https://idus.us.es/handle/11441/76281>
- ICOMOS (2011): *Documento de Madrid. Criterios de Conservación del Patrimonio Arquitectónico del s.XX. 2011*. ICOMOS. <https://icomos.es/wp-content/uploads/2020/01/documento-de-madrid-icomos.pdf>
- Oke, T. R. (1988): «Street design and urban canopy layer climate». *Energy Build*, 11, 103-113. [https://doi.org/10.1016/0378-7788\(88\)90026-6](https://doi.org/10.1016/0378-7788(88)90026-6)

- Van Oers, R. (2003): «Introduction to the Programme on Modern Heritage». En R. Van Oers y S. Haraguchi (Eds.), *World Heritage Papers n° 5 – Identification and Documentation of Modern Heritage* (pp. 8-14). UNESCO – World Heritage Centre. http://whc.unesco.org/documents/publi_wh_
- Pareja López, E. y Peña Fernández, F. (1994): *Medio siglo de vanguardias*. Ed. Gever.
- Ratti, C., Baker, N., y Steemers, K. (2005): «Energy consumption and urban texture». *Energy and Buildings*, 37(7), 762-776. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2004.10.010>
- Xue, P., Mak, C. M. y Cheung, H. D. (2014): «The effects of daylighting and human behavior on luminous comfort in residential buildings: A questionnaire survey». *Building and Environment*, 81, 51-59. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.06.011>

6

Caracterización geotécnica de la barriada de El Plantinar

Beatriz Zapico-Blanco* y Antonio Morales-Esteban*

* *Departamento de Estructuras de Edificación e Ingeniería del Terreno
Universidad de Sevilla*

RESUMEN

La barriada de El Plantinar se encuentra en el sudeste de Sevilla. Su suelo forma parte de la cuenca del Guadalquivir y, como tal, se originó con el hundimiento del valle Penibético y su posterior relleno con depósitos secundarios y terciarios. Posteriormente, las aguas tranquilas del río fueron depositando rellenos cuaternarios de aluvión.

La estratigrafía de este suelo refleja su formación. Comienza con un relleno antrópico, de desarrollo ligado al de la ciudad. A continuación se encuentran las terrazas fluviales, con arcillas marrones en los estratos superiores, que en la zona bajo estudio son de expansividad baja. A continuación hay varios metros de arenas y limos más bien finos, para terminar con casi una decena de metros de grava en matriz arenosa. La base de esta zona la forman margas del mioceno medio-superior, o marga azul del Guadalquivir.

Para caracterizar de manera específica el suelo de la barriada, se ha creado una base de datos con estudios geotécnicos cercanos. Los datos obtenidos se han sometido a un análisis espacial, por medio del método de la Distancia Inversa Ponderada, para obtener un perfil geotécnico medio. Del mismo modo, se ha realizado un estudio estadístico de los datos, obteniéndose valores medios, máximos y mínimos, así como su desviación típica.

Los datos obtenidos (cotas geotécnicas, número de golpes, propiedades geotécnicas y nivel freático) se presentan en este capítulo mediante ilustraciones y tablas. También se describe de modo detallado el método empleado para su obtención.

6.1. SITUACIÓN DE LA BARRIADA

La barriada estudiada se encuentra en Sevilla, más concretamente en el barrio del mismo nombre. Este barrio pertenece al distrito Sur de Sevilla, localizándose en su zona norte, siendo colindante con el barrio del Nervión (ver figura 6.1 y figura 6.2)

La zona se caracteriza por su eminente planeidad, como se pone de manifiesto en la figura 6.3.

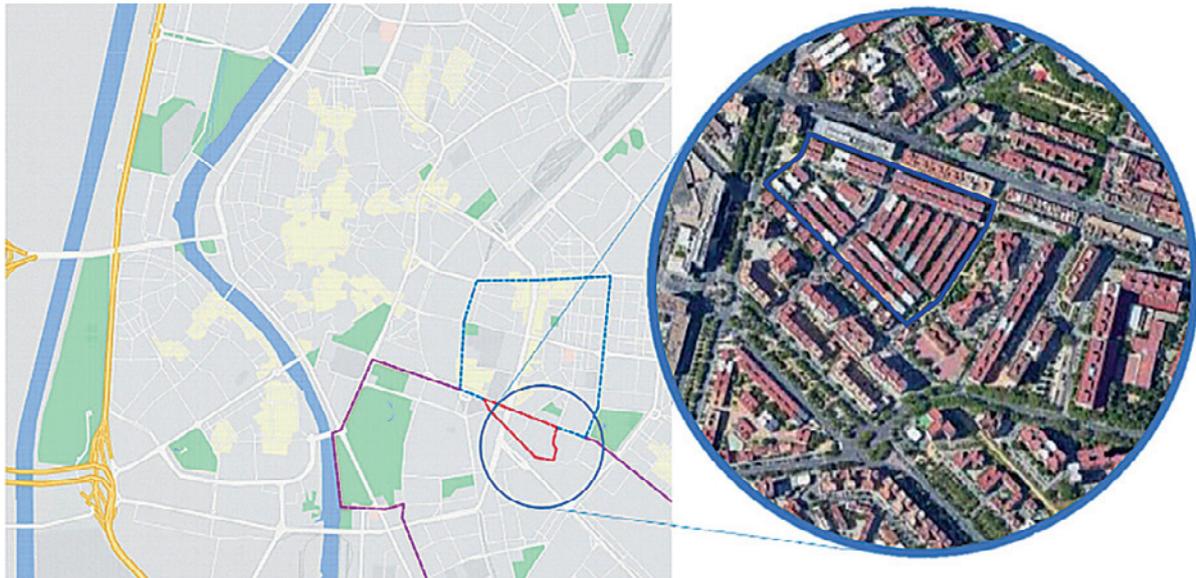


Figura 6.1. Ubicación de la barriada bajo estudio, en azul oscuro. En azul claro, barrio del Nervión. En fucsia, distrito Sur de Sevilla. En rojo, barrio de El Plantinar. Imagen adaptada a partir de Google Maps y Google Earth



Figura 6.2. Barriada de El Plantinar, en relieve. Imagen adaptada a partir de Google Earth

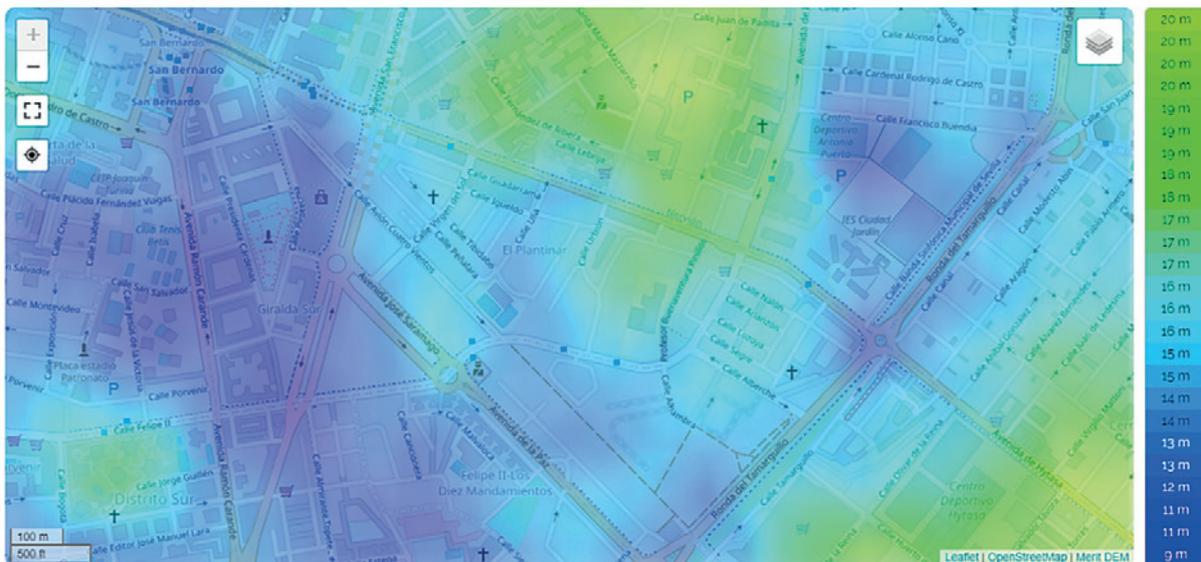


Figura 6.3. Cotas de superficie de la zona de El Plantinar (extraído de topographic-map.com)

6.2. MARCO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICO

La historia geológica de Sevilla está marcada por dos elementos principales: el accidente tectónico de la falla del Guadalquivir y los depósitos terciarios del mismo río. De este modo, su configuración actual es consecuencia del hundimiento del valle Penibético y de su relleno posterior por depósitos, ocultos en gran parte por los aluviones del cuaternario. Esta historia da lugar a la depresión del Guadalquivir, una llanura triangular de poca altitud (< 250 m en su mayor parte). Está limitada por Sierra Morena al norte y por la cordillera Penibética al sur, abriéndose ligeramente al Atlántico. El río Guadalquivir, que le da nombre, recorre la depresión drenándola y está bordeado por terrazas fluviales. En una de estas terrazas se encuentra la zona estudiada, al este del río.

6.2.1. Tectónica

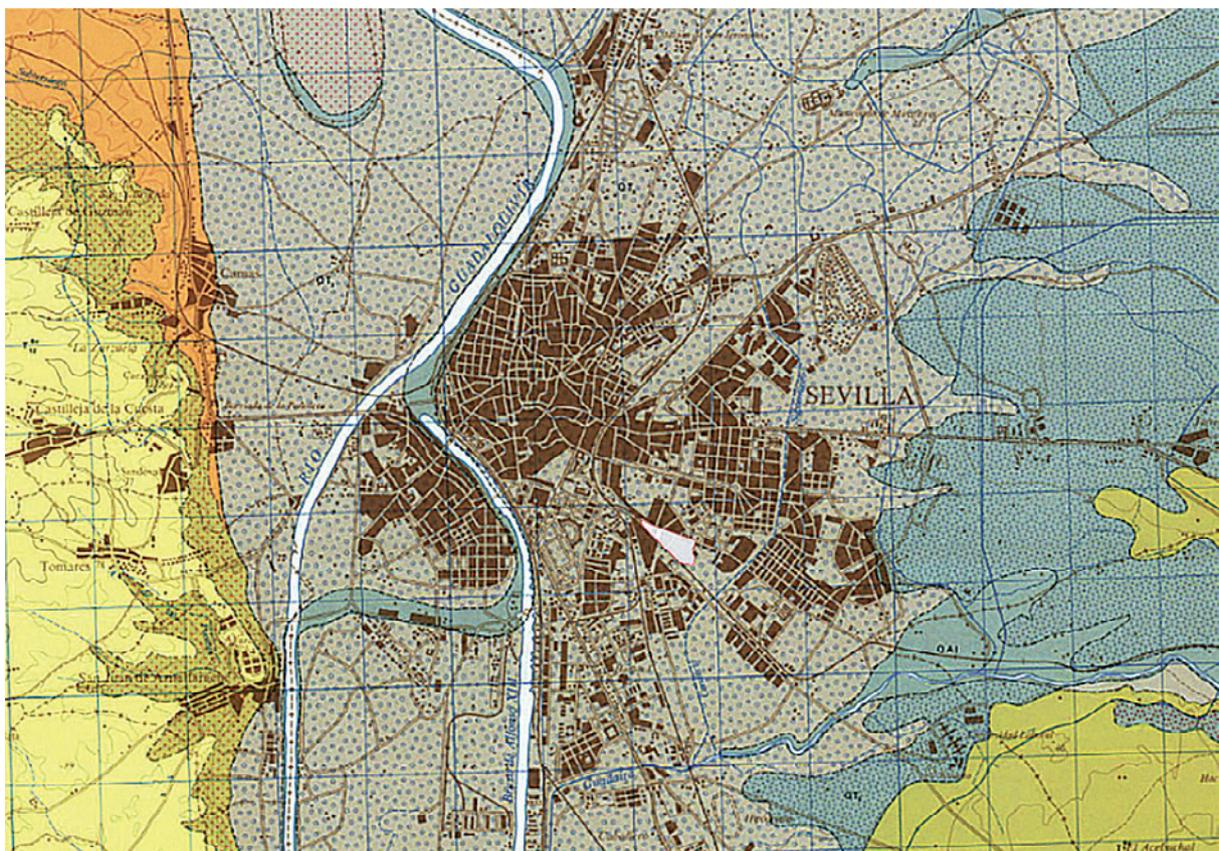
La tectónica de Sevilla es consecuencia del hundimiento del valle Penibético y de su posterior relleno con depósitos secundarios y terciarios. En algunas zonas, estos rellenos están cubiertos por aluviones cuaternarios.

A este accidente tectónico se le conoce como la falla del Guadalquivir. Fue la causante de la separación entre la parte sur de la región, de gran llanura, y el área montañosa de la Sierra Norte. Se trata en realidad de un sistema de fallas virtualmente paralelas, que fueron formando el feosinclinal Penibético de forma progresiva. Se estima que la primera fractura data de antes del período Pérmico.

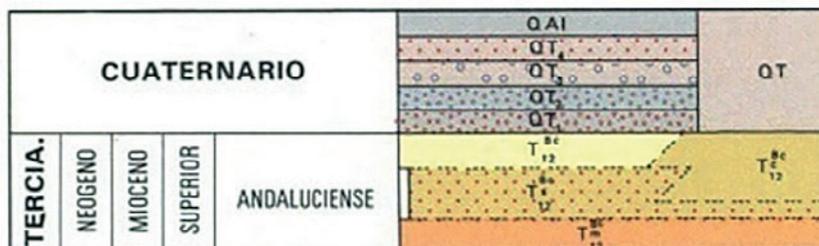
La Depresión se hundió en el plegamiento Alpino, a la vez que se levantaban las Cordilleras Béticas. El área estuvo ocupada por el mar, pasando paulatinamente a ser un lago litoral que

se iría colmatando. Posteriormente se rellenó con sedimentos (depósitos secundarios y terciarios), mayoritariamente de origen marino. En el cuaternario, las distintas terrazas que forman la campiña, se van adaptando al río y a la erosión que este conlleva. Al bajar el nivel del río, van apareciendo en la cuenca promontorios miocenos y terrazas cuaternarias cada vez más bajas (ver figura 6.4).

En la cuenca del Guadalquivir se distinguen dos tipos de materiales, separados atendiendo a su origen tectónico. Los materiales alóctonos, debidos a desplomes gravitatorios, proceden de las zonas externas de las Cordilleras Béticas. Incluyen materiales desde el Triásico hasta el Mioceno



LEYENDA



- QAI Limos, arenas y arcillas
- QT Cantos rodados y arenas
- QT₄ Cantos rodados, arena y arcillas
- QT₃ Cantos rodados, arena y arcillas
- QT₂ Cantos rodados, arena y arcillas
- QT₁ Cantos rodados, arena y arcillas
- T₁₂^{nc} Calcarenita y arenisca
- T₁₂^{nc} Limos arenosos
- T₁₂ Margas marrones y arenas
- T₁₂ Margas azules

Figura 6.4. Mapa geológico 1:50.000, Sevilla (1984). Barrio de El Plantinar en gris y rojo.

Modificación con fuente IGME

inferior, con una litología muy variada. Por otro lado, las series autóctonas se van acumulando antes, durante y posteriormente a las alóctonas, desde el Mioceno superior al Plioceno. Están formadas por sedimentos terciarios y cuaternarios. Estos sedimentos, abiertos al mar desde el Mioceno, se depositaron en aguas tranquilas, por lo que son por lo general consistentes, finos y cohesivos. Litológicamente hablando, predominan margas, arcillas y arenas, con poco material grueso, si bien se pueden encontrar calcarenitas puntualmente (Galán Huertos *et al.*, 1989).

6.2.2. Estratigrafía

Como se vio en la sección anterior, la zona se divide en dos edades geológicas separadas por una línea en dirección norte a sur: terciaria y cuaternaria. La zona que nos ocupa se ubica al este de esta línea, perteneciendo a la edad cuaternaria (ver figura 6.4).

La zona cuaternaria se divide entre diluvial y aluvial. Si se consideran como aluviones modernos exclusivamente los que se están depositando en la actualidad, El Plantinar está dentro del aluvial. En los aluviones modernos, predomina la arcilla como elemento principal, en la forma de un barro más bien oscuro. La presencia de gravas o bolos no se suele verificar. De forma cronoestratigráfica, se definen las siguientes formaciones (IGME):

Margas (mioceno medio-superior)

La base de esta zona está formada por Margas Azules, consecuencia de una cuenca de origen marino. Se trata de margas carbonatadas/arcillosas, de color gris azulado que presentan muy poca o ninguna estratificación. En algunas áreas pueden aparecer algo limosas. Son compactas y duras cuando el contenido en carbonato cálcico es alto (Vázquez Boza *et al.*, 2015). En algunos casos, pueden desprender mal olor debido a la abundancia de microfauna y aparecen de color casi negro en las zonas con alto contenido en materia orgánica. En la superficie, la marga pasa a un color más amarillento, gracias al óxido de hierro.

En la zona de estudio, situada en la margen izquierda del Guadalquivir, el estrato pasa a calcarenitas al acercarse al techo. En el tramo de alternancia, el paso es a limos y margas; y en la margen derecha, a limos arenosos.

El resto de los estratos se asientan sobre esta marga siguiendo una secuencia de colmatación.

Terrazas fluviales

Las terrazas están constituidas por depósitos, generalmente gravas en una matriz arenosa, que se alternan con arenas. A menor profundidad, pasan primero a limos y después a arcillas de color rojizo.

Gracias a la anchura del cauce, los niveles de las terrazas tienen cotas muy similares y, en algunos casos, se observan solapamientos. En particular, se tienen tres niveles: superior, intermedio e inferior (de cota más profunda a menos), correspondiéndose con un patrón de sedimentación.

El **nivel superior** (QT₂ – gravas) presenta cantos de hasta 20 cm, algo de arcilla y gravas en matriz arenosa o limosa. Este nivel está distribuido en bancos tabulares y va pasando a una

arena arcillosa de color rojizo, tanto lateral como verticalmente. Estas gravas están en contacto con las margas azules características de la zona, con una profundidad de muro de entre 12 y 20 metros y potencias de 8 metros.

El **nivel intermedio** (QT₃ – arenas/limos) está formado por limos y arcillas marrones. Aparecen también arenas, de tamaño más bien fino. La pérdida de carga en la corriente que produce el cambio de dirección del Guadalquivir en Sevilla hace que solo se depositen arenas y limos arenosos marrones o amarillentos en las zonas más bajas. El espesor de este nivel oscila entre de cuatro a diez metros.

El **nivel inferior** (QT₄ – arcillas) tiene un espesor variable, entre los dos y los cuatro metros, y se compone de arcillas marrones.

Rellenos

Los rellenos que se encuentran en Sevilla son antrópicos, formados por vertidos de escombros y basura mezclados con materiales naturales en algunas partes, y por elementos pertenecientes a la construcción de estructuras e infraestructuras urbanas y de comunicación. Como tal, su desarrollo es muy variable, unido al desarrollo del centro urbano.

Existen también rellenos históricos, de coloración marrón, aspecto limoso y consistencia muy baja. En ellos, aparecen restos cerámicos de distintas épocas.

6.2.3. Mineralogía y geotecnia

Desde el punto de vista geotécnico, los suelos sobre los que se asienta el área urbana de Sevilla presentan una variabilidad relativamente alta, tanto en profundidad como lateralmente. Sin embargo, se puede destacar el carácter arcilloso o arcillo-limoso en la mayoría de las zonas. En base a esto, la mayoría de los suelos tienen una plasticidad media.

Estos suelos presentan una distribución granulométrica muy normal, bien graduados y muy semejantes, especialmente para los elementos finos, en línea con su naturaleza como sedimentos finos depositados por aguas a baja velocidad (meandros del río). Prevalece la presencia de elementos finos, con casi un 40% de arcilla, un tercio de limos y menos del 30% de arenas. El coeficiente de variación en las arenas, sin embargo, es bastante alto. La presencia de carbonato cálcico es variable, siendo más abundante en la periferia de la ciudad. Se concentra en las fracciones limosas (60%), mientras que el resto se divide por partes iguales entre la arena y la arcilla.

Aunque los suelos sean de composición granulométrica distinta, las mismas condiciones de formación se traducen en una plasticidad afín. La mayoría de los suelos se corresponden con el grupo CL (75%), arcillas inorgánicas de mediana plasticidad. Una minoría pertenece al grupo CIH, correspondiendo con la periferia de la ciudad, donde además, la mayor parte se define como arcillas plásticas. La zona donde se sitúa El Plantinar corresponde con los suelos CIM-CIH (Galán Huertos *et al.*, 1989).

Respecto a la expansividad, el suelo en el área metropolitana de Sevilla reviste una cierta peligrosidad, con buena parte de los estudios realizados en Sevilla calificando la expansividad

como «crítica» (30%). Estos estudios, sin embargo, corresponden a zonas periféricas, al noroeste y al sur del centro urbano, no correspondiéndose con el área de relevancia en este estudio. Refiriéndose a la capacidad portante del suelo y a las condiciones exigidas para terraplenes, el suelo se califica como tolerable bajo todo el área urbana.

Mineralógicamente hablando, el área urbana de Sevilla se puede dividir en varias zonas (Galán Huertos *et al.*, 1989). La zona correspondiente a la barriada bajo estudio se caracteriza por una gran semejanza mineralógica de los horizontes más y menos superficiales, por lo que referirse a valores medios del perfil resulta adecuado. Se observa una elevada proporción de illita bien cristalizada (> 80%), con bajos valores de montmorillonita (9%) y caolinita (10%). De acuerdo con esta alta proporción de minerales illíticos de cristalización alta, el contenido en K₂O es uno de los más altos de Sevilla (3,41 % en media). Del mismo modo, presenta la capacidad de cambio más baja del área urbana (30,9 de media).

6.2.4. Hidrogeología

En Sevilla, la red hidrogeológica es muy sencilla, siendo el Guadalquivir el río principal. A él se unen el Huelva, al norte, y el Guadaíra, al sur.

Las condiciones de permeabilidad de la región varían mucho, dependiendo de la composición del terreno. En todo caso, existen siempre aguas subterráneas a distancias relativamente pequeñas. Aquí se puede hacer una distinción entre el diluvial y el aluvial. La barriada de El Plantinar está ubicada en la zona aluvial (ver figura 6.5). En esta, el terreno está recubierto de aluviones, limosos y arcillosos, con lo que disminuye la probabilidad de encontrar agua a poca profundidad. En el diluvial, la existencia de arenas en la superficie es mayor, lo cual hace más rápido el paso del agua a niveles inferiores. Es por esto que se crean almacenamientos de agua más grandes sobre las arcillas terciarias (IGME).

El sistema acuífero más cercano a la zona estudiada es el de Sevilla-Carmona, de 1150 km², en la margen izquierda del Guadalquivir, con una topografía que se suaviza hacia el río. Las margas azules del mioceno superior componen tanto la base impermeable como el límite oriental de este acuífero, que limita al sur con el río Guadaíra y al oeste con las terrazas del Guadalquivir (Vázquez Boza *et al.*, 2015).

La principal fuente de recarga del sistema es el agua de lluvia que se infiltra en los afloramientos de calcarenitas. Toda la zona del cuaternario se encuentra hidráulicamente conectada con el río Guadalquivir, por lo que la relación entre el río y el acuífero es muy estrecha. Por este motivo, el río Guadalquivir constituye uno de los dos ejes principales de drenaje del sistema, siendo el segundo el río Guadaíra. Esto a su vez condiciona los sentidos generales del flujo de agua, directamente de las calcarenitas al Guadaíra, o indirectamente, a través de las terrazas cuaternarias, al Guadalquivir. Las variaciones de nivel son estacionales, con prevalencia de los períodos de descenso y amplitudes que llegan a los 10 m. El nivel freático bajo la barriada de El Plantinar está a 5-7 m.

La región del valle del Guadalquivir se caracteriza por una sequía virtualmente total de junio a septiembre, concentrándose la mayor parte de la lluvia en los meses de noviembre a marzo. La media al año es de 540 mm, que cae en 60-70 días.

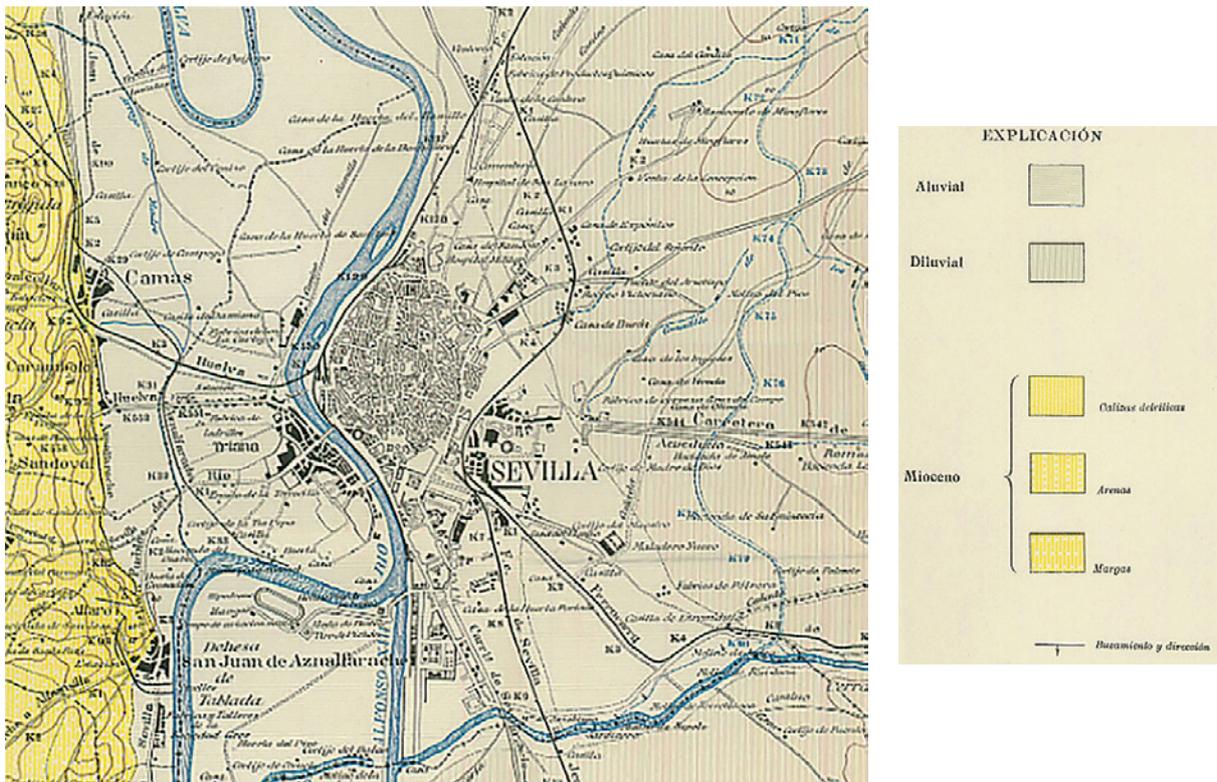


Figura 6.5. Aluvial y diluvial de Sevilla (IGME)

6.3. ESTUDIOS GEOTÉCNICOS EXISTENTES

Para el estudio geotécnico de la barriada de El Plantinar no se llevaron a cabo ensayos *ad hoc*, sino que se empleó una base de datos de estudios realizados en la ciudad de Sevilla, previamente recopiladas por el equipo investigador (ver figura 6.6).

En total se encontraron diez estudios en localizaciones cercanas a la barriada. Los datos presentes en los distintos estudios geotécnicos se elaboraron para obtener una aproximación fidedigna de las propiedades del suelo bajo la barriada como se describe a continuación.

Se empleó como publicación de referencia un estudio realizado en la Avenida de Ramón y Cajal, dada su cercanía con la barriada y por ser un estudio muy completo (ver figura 6.6). El estudio se realizó con motivo de la reforma de tres parcelas rectangulares. Para el reconocimiento se realizaron sondeos mecánicos a rotación, complementados con ensayos SPT y se extrajeron muestras de suelo inalteradas, que se emplearon para la caracterización en laboratorio. Este documento se empleó como referencia para definir los parámetros geotécnicos del suelo, contrastándolos con los valores estadísticos obtenidos del resto de los estudios tratados.

Los datos presentes en los estudios se trataron como sigue:

- Para cada uno de los estudios considerados, se realizó un estudio estadístico a partir de los datos provenientes de cada sondeo o muestra, obteniéndose máximos, mínimos, media y desviación típica de los parámetros.
- Se creó una base de datos en la que se incluyó la información sobre la estratigrafía y la caracterización geotécnica realizada en cada estudio.

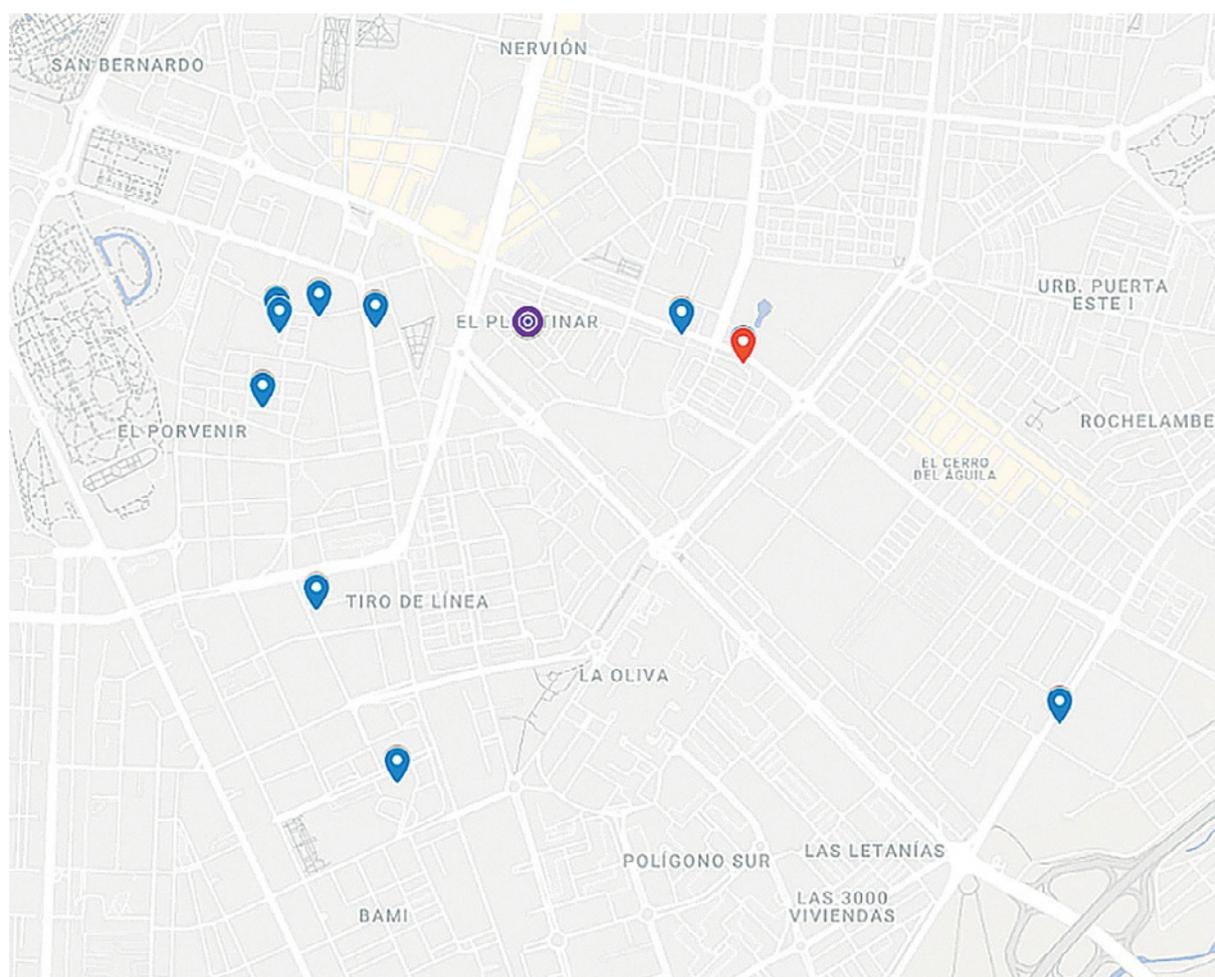


Figura 6.6. Ubicaciones de los estudios geotécnicos existentes empleados en el estudio (azul) y del centro de la barriada de El Plantinar (morado). Estudio de referencia en rojo

- La base de datos se completó con variables derivadas (como las estadísticas o la clasificación del suelo), así como con valores generales obtenidos de la literatura (IGME, Galán Huertos *et al.*, 1989).
- Se calculó la distancia de cada uno de los estudios al centro geométrico de la barriada. Con este dato, se procedió a realizar un análisis espacial, empleando el método de la Distancia Inversa Ponderada (IDW). En este método, los datos provenientes de cada estudio geotécnico se ponderan en una interpolación lineal, de modo que la influencia de un punto es mayor cuanto más cerca se encuentre de la ubicación en la que se quiera calcular el valor. Así, cada variable se calcula como:

$$y = \frac{\sum_{i=0}^n y_i \cdot \frac{1}{d_i}}{\sum_{i=0}^n \frac{1}{d_i}} \quad \text{Eq. 6.1}$$

siendo y_i el valor de esa variable en el estudio i , y d_i la distancia de la localización de ese estudio al punto de interés.

- La base de datos se completó con estos datos ponderados, incluyendo un estudio estadístico de los mismos.
- A partir de la base de datos, se obtuvo el corte estratigráfico representativo de la barriada (ver figura 6.8), así como la tabla de propiedades geotécnicas (ver apartado 6.3.2, página 129) y nivel freático (6.3.3, página 130) de la misma.

A la hora de determinar qué punto elegir para realizar el análisis espacial de los datos, se tuvieron en cuenta dos escenarios. El primero se elaboró teniendo en cuenta las características geológico-geotécnicas del área estudiada (ver apartado 6.2, página 121), a partir del cual se puede suponer que la dirección de gradiente de los estratos de la parcela de El Plantinar será este-oeste, perpendicular al cauce del río en esa área. Así, se seleccionaron un grupo de estudios geotécnicos a ambos lados de la barriada, extrayéndose los distintos espesores estratigráficos, y estudiándose estadísticamente. Los resultados se pueden observar en la tabla 6.1, donde queda de manifiesto que la diferencia de cota en esta dirección de los distintos estratos es despreciable.

Tabla 6.1. Profundidades de muro de los distintos estratos a este y oeste de la barriada.
Elaboración propia

Estrato	Oeste. Profundidad de muro	Este. Profundidad de muro
0 Relleno	2,1 ± 0,8	2,3 ± 0,9
A Arcilla	5,7 ± 1,8	6,5 ± 0,5
B Arena	8,0 ± 1,6	9,5 ± 0,0
C Grava	19,0 ± 1,6	20,5 ± 0,0
D Marga	> 25	> 22,5
	[m] ± 1,6	[m] ± 0,5

En segundo lugar, se eligieron cuatro puntos en los extremos y el centro de la parcela estudiada (ver figura 6.7). Al igual que en el caso anterior, las diferencias entre las cotas de los distintos estratos son despreciables. En base a los resultados de estos dos escenarios, se decidió seleccionar el centro de la parcela como punto único para la determinación del corte y las propiedades geotécnicas.

Los resultados del estudio son consistentes con los términos generales expuestos en el apartado 6.2:

Los rellenos, formados por arenas limoarcillosas marrones-rojizas y limos arenosos grises, presentan también restos de escorias, escombros, materia orgánica y cerámica. Son consistentes con rellenos de aluvial reciente y presentan una consistencia baja. Su espesor medio es de 2,1 m.

Debajo de los rellenos aparece una arcilla marrón-grisácea, con una profundidad de muro media de 6,4 m. Es consistente con la naturaleza aluvial del terreno, tratándose del depósito final de la secuencia aluvial del Guadalquivir, observándose algunos restos bioclásticos.

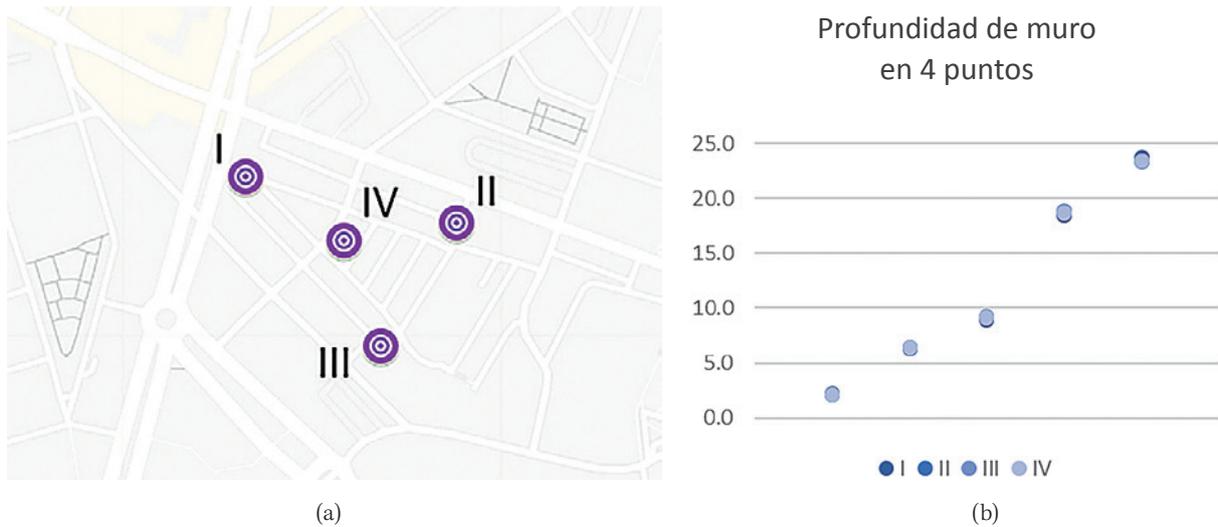


Figura 6.7. Puntos de cálculo para la interpolación espacial (a) y profundidad de muro (en metros) de los estratos para cada uno de ellos (b)

Presenta una consistencia moderada. Se puede clasificar como CIM-CIH y su grado de expansividad es bajo.

El estrato por debajo de este se corresponde con arena y limos arcillosos grisáceos, hasta una profundidad de muro media de 9,1 m. El nivel de consistencia aumenta, sin llegar a ser alto.

A continuación aparece una grava arenosa marrón, hasta una profundidad media de 18,7 m. Correspondiente con el depósito aluvial basal del Guadalquivir, presenta algunos cantos, de naturaleza principalmente cuarcítica. Se trata de un estrato muy denso o compacto.

La grava da paso a un sustrato de arcillas margosas miocénicas que presenta varias decenas de metros de espesor. Su consistencia es dura con una resistencia media de 450 kPa.

6.3.1. Cotas geotécnicas

En la figura 6.8 se puede apreciar el corte geotécnico derivado de los estudios realizados.

6.3.2. Propiedades geotécnicas

Las propiedades geotécnicas, al igual que las cotas, se obtuvieron por interpolación inversa ponderada de los datos presentes en estudios geotécnicos existentes. Además, se realizó un análisis estadístico de los parámetros, calculándose los valores mínimos, máximos, medios y la desviación típica. Los resultados se pueden observar en la siguiente tabla 6.2 para cada estrato.

Como se puede observar, estos valores son coherentes con los esperados para la zona estudiada.

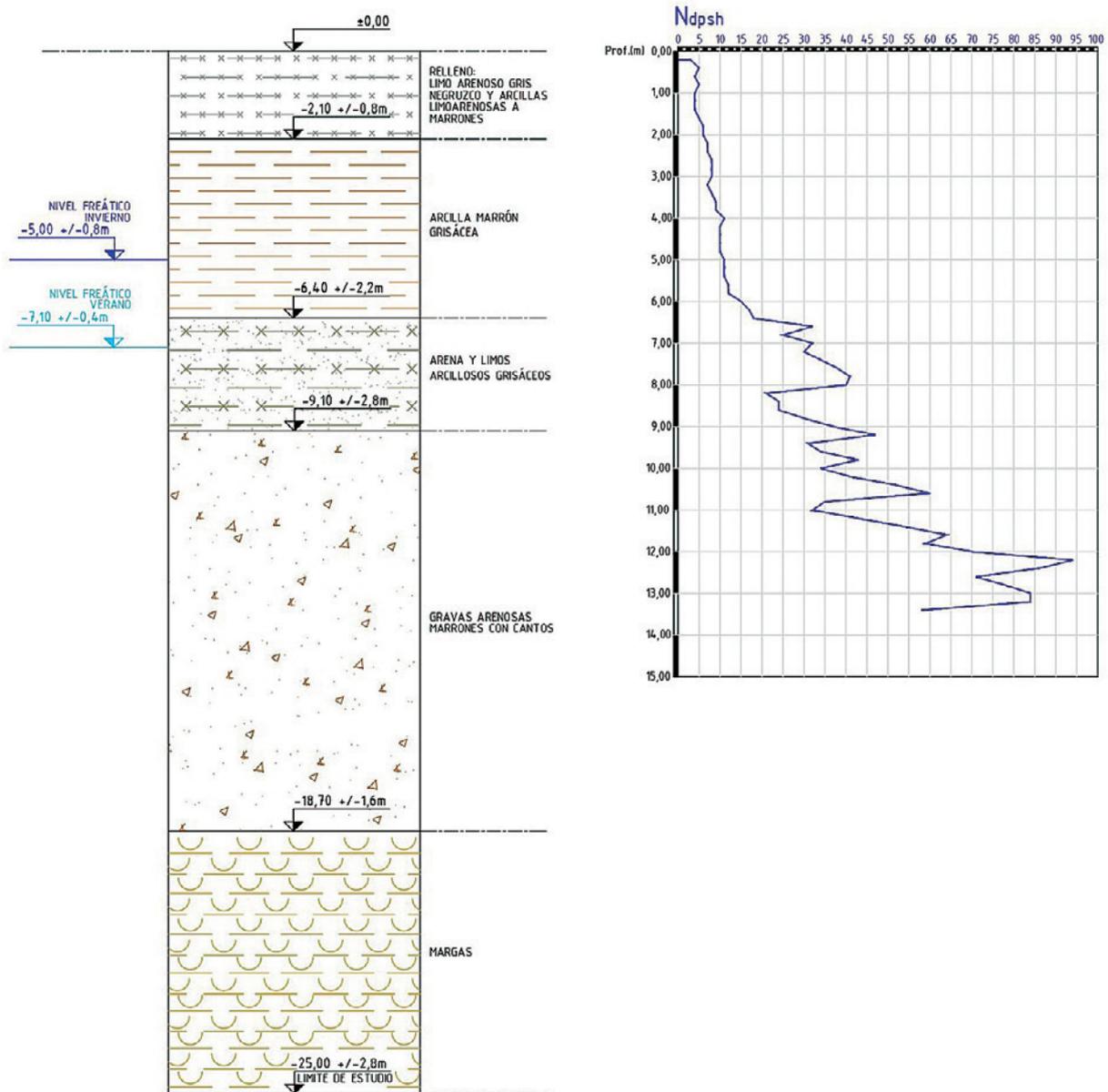


Figura 6.8. Corte estratigráfico, ilustración de Pablo Zapico Blanco

6.3.3. Nivel freático

La profundidad del nivel freático en El Plantinar se ha estudiado igualmente en función de los estudios geotécnicos existentes en las inmediaciones. Los datos se han separado por fecha de recopilación (verano *vs.* invierno) y se ha procedido a interpolar linealmente los valores en función de su distancia respecto al centro de la barriada, como se vio en el punto anterior.

El resultado ha sido una profundidad del nivel freático mínima de 5,0 m, en invierno, y una máxima de 7,1 m, en verano (ver tabla 6.3).

Tabla 6.2. Propiedades geotécnicas de cada estrato

Estrato	Valor	Clasificación	γ [kN/m ³]	Seco γ_d [kN/m ³]	c' [kPa]	c_u [kPa]	ϕ' (°)	N_{SPT}	q_u [kPa]	w_L	w_p	IP	w [%]
0: Relleno	Media		17,0	15,0	18,5	10,0	22,0	11,9	20,0	38,4	21,6	16,8	
	±		0,0	0,0	1,5	0,0	4,0	9,3	0,0	0,0	0,0	0,0	
	Mínimo		17,0	15,0	17,0	10,0	18,0	2,0	20,0	38,4	21,6	16,8	
	Máximo		17,0	15,0	20,0	10,0	26,0	27,0	20,0	38,4	21,6	16,8	
A: Arcilla	Media	CIIM	20,3	16,7	17,6	53,1	24,6	12,8	227,7	42,6	20,7	21,9	20,9
	±		1,1	1,3	8,2	27,4	4,8	5,7	169,1	11,3	2,8	9,5	5,3
	Mínimo		18,2	15,0	5,9	18,3	15,6	7,1	63,0	24,2	16,8	7,4	13,5
	Máximo		21,3	18,8	30,0	92,5	32,7	27,0	648,0	57,1	24,6	33,3	30,7
B: Limos/ Arenas	Media	CIIM	21,1	16,5	15,0		26,0	28,5	169,2	43,6	21,2	22,4	
	±		0,5	0,3	0,0		4,0	11,9	140,7	13,5	4,6	8,9	
	Mínimo		20,6	15,9	15,0		22,0	15,0	64,5	30,1	16,6	13,5	
	Máximo		21,6	16,5	15,0		30,0	47,8	368,0	57,2	25,8	31,3	
C: Gravas	Media		21,0	19,0			29,5	48,6		26,1	12,7	13,4	
	±		0,0	0,0			4,0	10,7		0,0	0,0	0,0	
	Mínimo		21,0	19,0			25,4	37,5		26,1	12,7	13,4	
	Máximo		21,0	19,0			33,5	63,0		26,1	12,7	13,4	
D: Margas	Media	CIH	20,6	16,0	65,5		23,8	21,8	448,7	55,1	22,6	32,3	24,0
	±		0,9	0,0	15,5		1,3	5,5	122,0	5,0	3,1	2,3	3,1
	Media												
	Mínimo		19,8	16,0	50,0		22,5	15,9	254,0	50,0	18,9	30,2	19,6
Máximo		21,8	16,0	81,0		25,0	29,1	586,8	63,3	27,1	36,2	26,7	

Tabla 6.3. Profundidad del nivel freático. Elaboración propia

Meses de invierno	Profundidad nivel freático [m]
Media	5,0
Mínima	4,0
Máxima	6,1
Desviación	0,8
Meses de verano	Profundidad nivel freático [m]
Media	7,1
Mínima	6,5
Máxima	7,5
Desviación	0,4

6.4. REFERENCIAS

- Galán Huertos, E. y Pérez Rodríguez, J. L. (1989): *Geología de Sevilla y alrededores y características geotécnicas de los suelos del área urbana*. Talleres gráficos del Excmo. Ayuntamiento de Sevilla.
- IGME. *Base Cartográfica. Mapas Geológicos, Hidrogeológicos y Geotécnicos*.
- Vázquez Boza, M., Durand Neyra, P., Morales Esteban, A. y de Justo Alpañés, J. L. (2015): *La marga azul del Guadalquivir. Naturaleza y caracterización*. Ed. Ediciones, Madrid.

7

Caracterización estructural y evaluación del comportamiento frente al sismo de edificios de antiguas barriadas

María-Victoria Requena-García-Cruz* y Antonio Morales-Esteban*

* *Departamento de Estructuras de Edificación e Ingeniería del Terreno
Universidad de Sevilla*

RESUMEN

La mayor parte de los edificios de muros de carga de mampostería han presentado un comportamiento sísmico deficiente ante terremotos en el pasado. Esto se debe a que solo fueron diseñados para soportar cargas gravitacionales, sin tener en cuenta criterios sísmicos o requisitos estructurales restrictivos. Por lo tanto, los trabajos de investigación sobre modelos robustos y reales, a la vez que simples, para simular su comportamiento sísmico se han incrementado a lo largo de los años. En este contexto, el modelo mediante pórticos equivalentes (PE) para las estructuras de mampostería se usa ampliamente en la práctica debido a su eficiencia computacional y a que el número de datos de entrada es asumible.

En este capítulo, se presenta la caracterización estructural y del comportamiento sísmico del edificio del caso de estudio seleccionado en la barriada del Plantinar. Se ha desarrollado un modelo numérico de un tipo estructural a partir del desarrollo de macroelementos que tienen en cuenta los dos tipos de fallo en el plano típicos en muros de carga: por cortante y por flexión. Se han realizado análisis estáticos no lineales para determinar la capacidad sísmica de la estructura y se ha determinado su comportamiento sísmico. Se ha calculado el nivel de seguridad sísmica del edificio, obteniéndose que no cumpliría los valores límites establecidos en la normativa sísmica.

7.1. INTRODUCCIÓN

La mayor parte de los edificios de muros de carga de mampostería han presentado un comportamiento sísmico deficiente ante terremotos en el pasado (Sorrentino *et al.*, 2019). Esto se debe principalmente a que solo fueron diseñados para soportar cargas gravitacionales, sin tener en cuenta criterios sísmicos o requisitos estructurales restrictivos (Krishnachandran y Menon, 2021). La mayoría de ellos presenta un comportamiento mecánico pobre y, en general, una calidad de construcción baja (Simões *et al.*, 2021). Estos factores hacen que el comportamiento de los muros de mampostería sea muy difícil de predecir y causa que estos edificios sean muy vulnerables a los terremotos (Cardinali *et al.*, 2021). Por lo tanto, los trabajos de investigación sobre modelos robustos y reales a la vez que simples para simular su comportamiento sísmico se han incrementado a lo largo de los años. Esto ha sido motivado por dos factores adicionales: las estructuras de mampostería representan una gran parte del parque inmobiliario de varios países y se encuentran ampliamente distribuidas en áreas de una sismicidad media-alta (Fagundes *et al.*, 2017).

Según el daño sísmico observado, factores como la calidad de los muros, el tipo de diafragmas o elementos horizontales y la presencia de elementos de conexión (tirantes o vigas de hormigón armado [HA]) pueden afectar significativamente la respuesta sísmica de estos edificios (Lagomarsino *et al.*, 2021). Además, la localización del daño o posible colapso o fallo de los muros es sensible a las propiedades no lineales de los materiales (Tomić *et al.*, 2021).

Existen varias estrategias de modelado para estudiar la respuesta global de las estructuras de muros de mampostería: los modelos de elementos finitos ([EF] basados en los modelos de leyes constitutivas continuas) y el método del pórtico equivalente (PE) (Cattari *et al.*, 2021). Los modelos de EF son complejos para ser aplicados en análisis centrados en una gran cantidad de edificios debido a su alto coste computacional y a la gran cantidad de datos de entrada requeridos (Raka *et al.*, 2015). Esta estrategia se emplea generalmente para estructuras irregulares, complejas o especiales. Por el contrario, la idealización mediante el PE de estructuras de mampostería se usa ampliamente en la práctica de la ingeniería debido a su eficiencia computacional y la aceptable cantidad de datos de entrada necesarios (Degli Abbatì *et al.*, 2021). Sin embargo, está sujeto a ciertas simplificaciones. La estrategia del PE se basa en la suposición de que la respuesta no lineal de cada muro de mampostería se concentra en paneles específicos: *piers* (P)–paneles verticales; y *spandrels* (SP)–paneles horizontales que conectan los *piers*. Las partes restantes de los muros se suelen idealizar como nudos rígidos, ya que no se ha observado daño sísmico en estas zonas (Lagomarsino *et al.*, 2013). El método del PE se establece como metodología de modelado y análisis de estos edificios en diferentes códigos sísmicos como el Eurocódigo-8 (EC8 [AENOR, 1998]), la norma sísmica italiana NTC-2018 (Ministerio italiano de infraestructuras y transporte, 2018) o la de Nueva Zelanda de 2006 (NZSEE, 2006).

Pese a las simplificación que realiza el método de PE, la idealización de los muros de carga como PE permite obtener resultados fiables, como se concluye en diversos trabajos de investigación. En Morandini *et al.* (2022) se realizaron diversas comparaciones entre los resultados obtenidos con modelos EF y otros siguiendo el esquema del PE. En Degli Abbatì *et al.* (2021) se llevaron a cabo análisis estáticos no lineales considerando diferentes *software* basados en el PE. Ambos trabajos obtuvieron variaciones mínimas de los valores de rigidez lateral inicial, el cortante basal, la capacidad de desplazamiento y el daño sísmico empleando ambas estrategias de

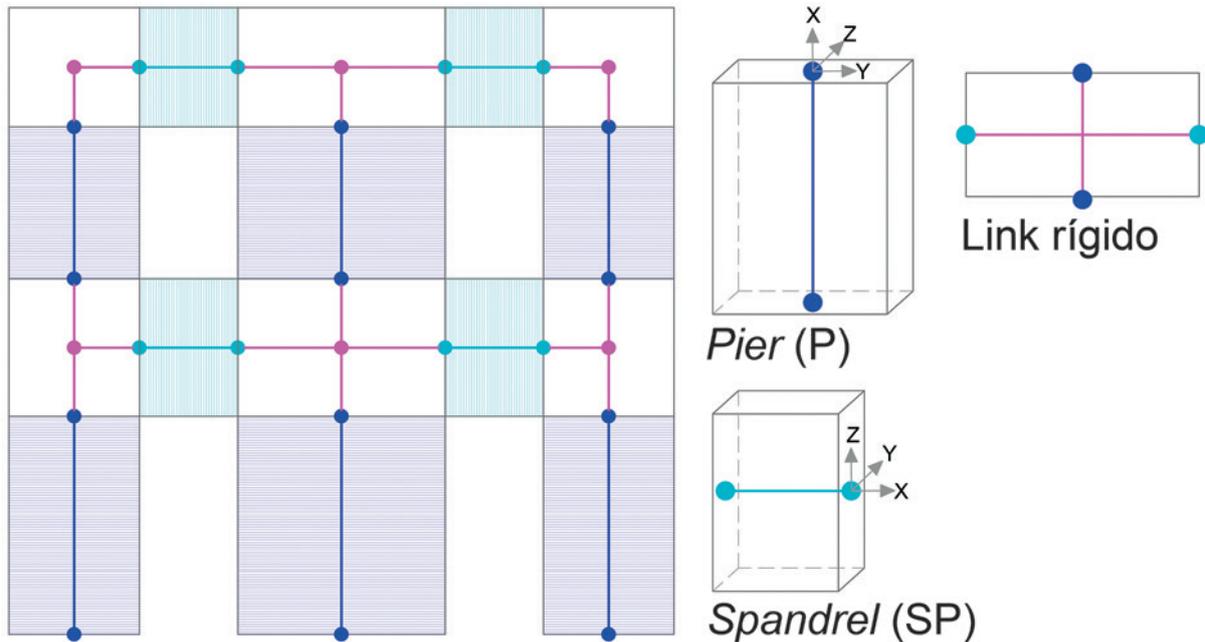


Figura 7.1. Idealización del método del pórtico equivalente para el análisis numérico de edificios de muros de carga

modelado. Sin embargo, en Manzini *et al.* (2020) se hizo hincapié en la necesidad de una cuidadosa selección de criterios apropiados para obtener resultados fiables.

La estrategia de modelado basada en el PE permite introducir otros elementos estructurales, como elementos de conexión (considerando que el comportamiento de estas estructuras se ve considerablemente afectado por los diafragmas/elementos horizontales) o incluso vigas o pilares de HA para evaluar estructuras mixtas (Lagomarsino *et al.*, 2013). Sin embargo, el comportamiento general de las estructuras de muros de carga depende principalmente de la calibración del dominio de resistencia adecuado de los elementos o paneles individuales, teniendo en cuenta cada modo de fallo (Calderini *et al.*, 2009). Además, es importante resaltar que la carga axial/vertical que actúa en cada panel varía durante los análisis no lineales horizontales. Esto se debe a la redistribución de esfuerzos producida por la aplicación de patrones de carga horizontales. Por tanto, el valor de la resistencia de los paneles de muros de carga varía durante los análisis. De hecho, como se señala en Dolatshahi *et al.* (2018), los resultados de los análisis estáticos no lineales muestran una relación entre carga axial y el cortante y la dimensión del panel se encuentran entre los factores que más incluyen en la capacidad de deriva/desplazamiento horizontal.

El comportamiento no lineal de las estructuras de mampostería se caracteriza por una respuesta combinada en el plano del muro y fuera del plano/muro (o fallo local), como varios estudios sobre los efectos de terremotos pasados (Cattari *et al.*, 2015). El comportamiento en el plano de los muros depende de la presencia de conexiones rígidas horizontales (forjados y vigas). Esto puede conducir a un comportamiento estructural similar al de una caja y que puede ser reproducido con precisión mediante el método del PE (Raka *et al.*, 2015). El comportamiento o fallo fuera del plano se produce por la falta de espesor de los muros o por conexiones ortogonales deficientes. Este tipo de fallo se omite normalmente en los modelos de PE (Penna *et al.*, 2014; Raka *et al.*, 2015) o en los *software* de cálculo específicos para edificios de muros de carga de mampostería

como 3Muri (S.T.A. DATA, 2018). No obstante, el comportamiento fuera del plano se puede calcular evaluando los mecanismos locales de colapso a través de la modelización específica o el procesamiento posterior de los resultados, como en 3Muri. En Pantò *et al.* (2017) se validó numérica y experimentalmente un nuevo macro-elemento para tener en cuenta el comportamiento combinado dentro y fuera del plano. Este elemento se empleó para modelar edificios históricos de mampostería de especial importancia y se caracteriza por un exhaustivo procedimiento de modelado: enlaces cuadriláteros con aristas rígidas, enlaces diagonales para considerar el cortante y muelles no lineales para simular la interacción superficial entre paneles. En Funari *et al.* (2022), Malomo y DeJong (2021) y Sharma *et al.* (2021) se desarrollaron macro-elementos basados en EF para simular adicionalmente el comportamiento fuera del plano. Sin embargo, estos elementos requerían una gran cantidad de datos de entrada y la calibración de muelles no lineales, lo que puede generar problemas de convergencia adicionales, como lo señalan los autores.

En general, se ha demostrado que el método de los PE es particularmente eficiente y suficientemente preciso como para simular el comportamiento no lineal de estructuras con un comportamiento similar a una caja (con suficientes conexiones horizontales, es decir, gobernadas por el comportamiento en el plano) en lugar de emplear modelos de EF más sofisticados (Milosevic *et al.*, 2020; Pavanetto *et al.*, 2020). Tanto los *piers* como *spandres* se suelen concebir como macro-elementos tipo barra que pueden capturar con precisión los diferentes tipos de fallo en el plano de los muros (flexión y cortante) mientras que el coste computacional es aceptable (Pavanetto *et al.*, 2020).

7.2. DESCRIPCIÓN DEL CASO DE ESTUDIO

7.2.1. La barriada del Plantinar

El antiguo barrio de ‘El Plantinar’ se encuentra al sureste de Sevilla (España) (figura 7.2) y fue construido durante los años 60. Ha sido seleccionada como caso de estudio por ser representativo y prototípico de las grandes barriadas de antigua construcción de Andalucía. El conjunto está compuesto por tres tipos diferentes de edificios combinados o separados por juntas estructurales con distinta orientación. Todos los bloques se caracterizan por la misma configuración estructural mixta: muros de carga de mampostería en el perímetro y un pórtico de HA en el centro con cinco plantas de altura. La barriada fue construida antes de la aplicación de códigos sísmicos en España, ya que la primera normativa sísmica restrictiva en vigor data de 1994. Por tanto, fueron diseñados únicamente según las cargas gravitatorias y no cumplen con los requisitos de seguridad sísmica.

7.2.2. Edificio seleccionado como caso de estudio

En este trabajo se ha seleccionado la edificación tipo 1 para ser analizada (figura 7.3). Es el más grande y se puede encontrar aislado según la composición de la barriada. Esto permite evitar en los análisis sísmicos los posibles efectos del golpeo entre edificios adyacentes (Angiolilli *et al.*, 2021), que pueden afectar al comportamiento sísmico de la estructura.

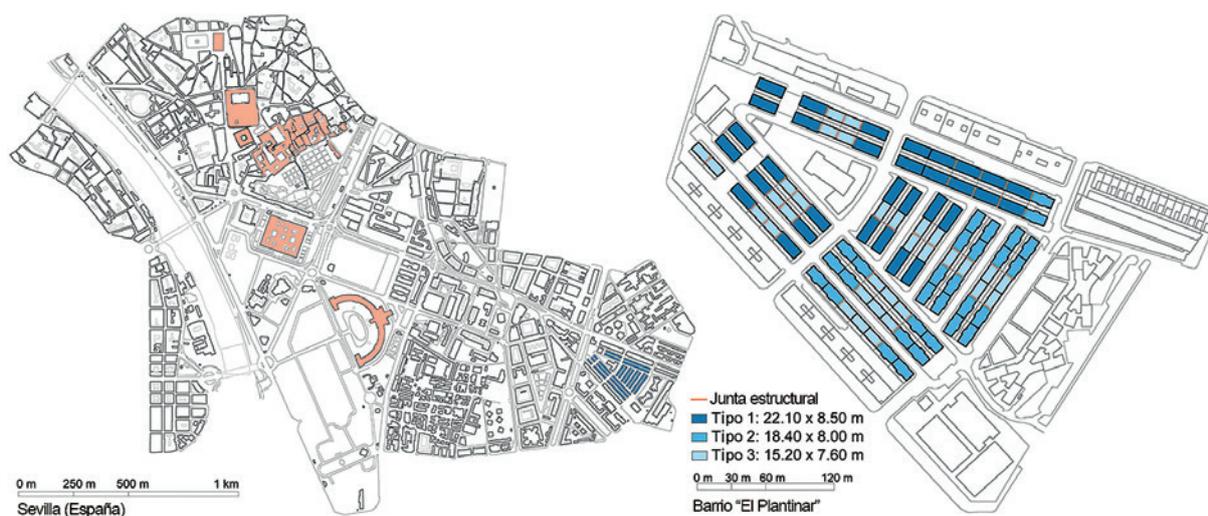


Figura 7.2. Localización de la barriada e identificación de los tipos estructurales

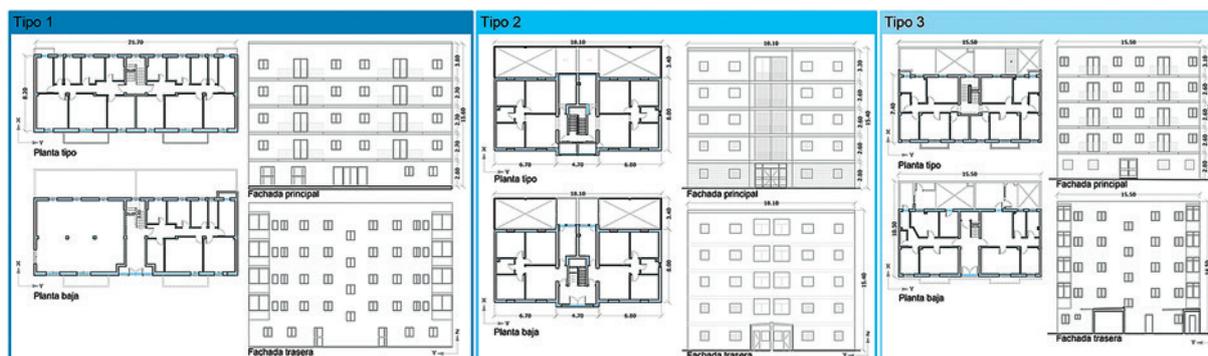


Figura 7.3. Configuración de los tipos edificatorios y estructurales identificados en la barriada

7.2.3. Determinación de la peligrosidad sísmica

Para este trabajo se ha empleado el espectro de respuesta según el EC8. La aceleración máxima del suelo de referencia para el suelo de tipo A (roca), a_{gR} , se ha determinado según la actualización española de los mapas de peligrosidad (Ministerio de Fomento de España, 2012). En este caso, para Sevilla, el valor de aceleración máxima, expresado como PGA , es de 0,09 g y para un período de retorno de 475 años. El tipo de suelo se ha obtenido del código sísmico español (NCSE-02) (Ministerio de Fomento de España, 2002), que considera para la ubicación de la edificación estudiada el tipo III. Este corresponde al tipo de suelo C según la clasificación del EC8. El factor de importancia que se emplea para amplificar el valor de la acción sísmica es de 1.

7.3. CARACTERIZACIÓN ESTRUCTURAL

El sistema estructural del edificio está formado por forjados unidireccionales de HA apoyados sobre muros de carga perimetrales y un pórtico central de HA (figura 7.4). Los muros se

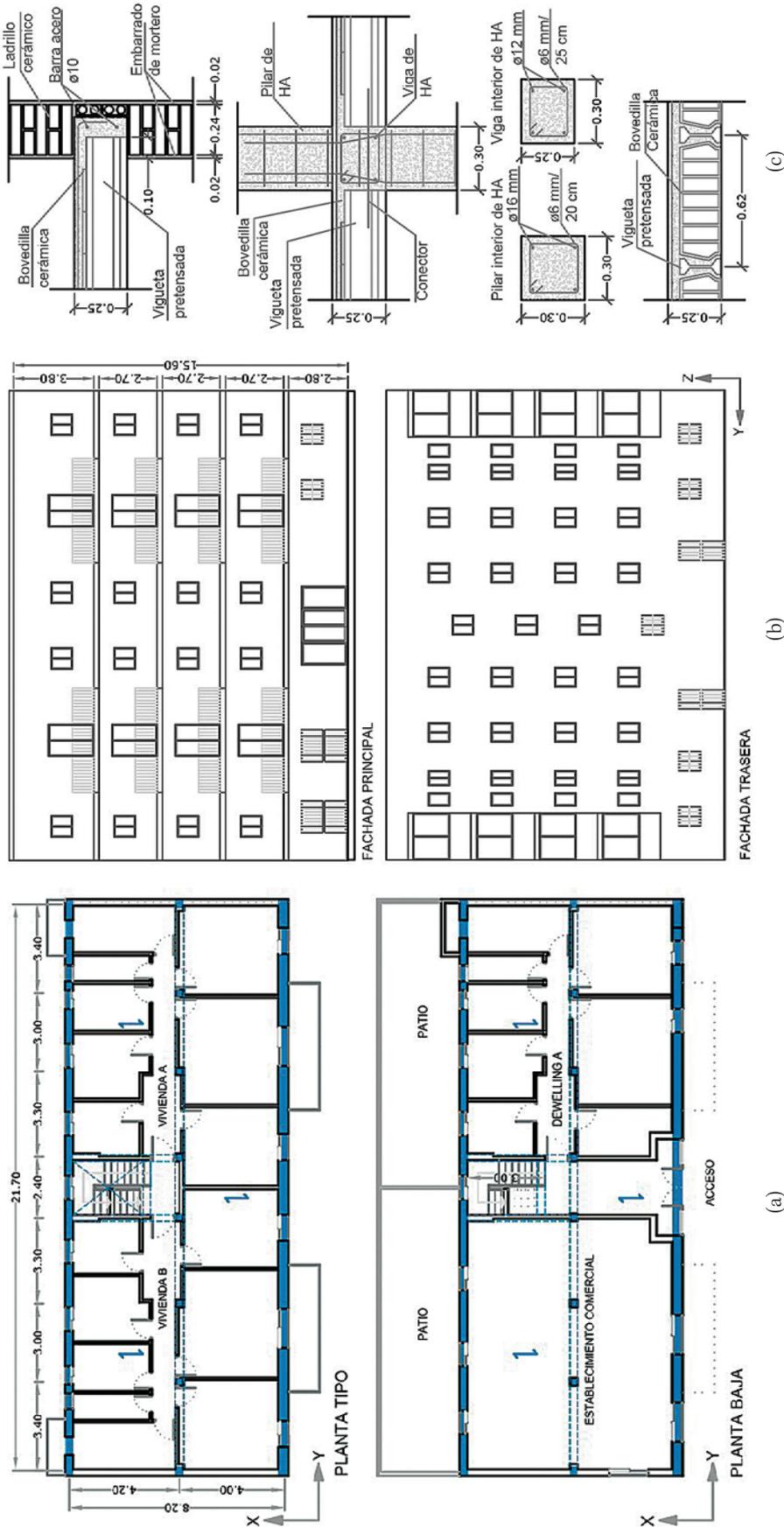


Figura 7.4. (a) Configuración estructural del tipo 1. (b) Fachadas principal y trasera del tipo 1. (c) Detalles constructivos

construyeron de ladrillo cerámico hueco de $24 \times 11,5 \times 5$ cm. Su espesor varía según la altura: en la planta baja son de 0,34 m y en el resto de plantas son de 0,28 m. Los forjados unidireccionales se construyeron con viguetas de hormigón pretensado y bovedillas cerámicas de 0,21 m de canto. Los forjados tienen una capa de compresión de HA de 0,04 m de espesor con armadura de reparto, lo que garantiza su rígido comportamiento. El sistema también presenta una viga de HA de 8 cm de anchura sobre los muros. Según su configuración estructural, el comportamiento de diafragma rígido de los forjados está garantizado así como las conexiones horizontales. Por tanto, no se producirá el fallo fuera del plano.

La determinación de los parámetros mecánicos necesarios para el modelado numérico se ha realizado a partir del análisis de resultados de ensayos experimentales realizados a ladrillos cerámicos obtenidos en otras investigaciones (tabla 7.1). Dada la falta de estudios y datos de referencia sobre fábricas de ladrillo hueco horizontal, se ha optado por incluir en el estudio los datos obtenidos sobre ladrillos cerámicos macizos.

Tabla 7.1. Propiedades mecánicas del comportamiento no lineal de muros de mampostería de ladrillo cerámico

	Referencias	E [GPa]	G [GPa]	W [kN/m ³]	c [MPa]	μ [-]	f_c [MPa]	ϵ_{cp} [-]	ϵ_{cu} [-]	f_t [MPa]	ϵ_t [-]	τ_0 [MPa]
Ladrillo macizo	Siano <i>et al.</i> , 2018	1.49					6.2	0.0009		0.18	1.8e-05	0.12
	Raka <i>et al.</i> , 2015	0.87	0.23	19		0.4	1			0.1		0.067
	Abrams y Shah, 1992	2.46	1.13				3.28			0.15		0.1
	Orakcal <i>et al.</i> , 2006				0.23	0.58	6.2	0.0009		0.18	1.8e-05	0.12
	Anthoine y Magonette, 1994						6.2 ± 12%					
	Corradi <i>et al.</i> , 2003										1.3e-05	0.69
	Pavanetto <i>et al.</i> , 2020	1.50	0.50	18			3.2			0.114		0.76
	Penna <i>et al.</i> , 2014	4.25	1.00	18			6					
	Peruch <i>et al.</i> , 2019	2.53	0.84				3.28			0.14		0.093
	Cattari <i>et al.</i> , 2021						5-6.2	0-0.003	0.008-0.012	0.15-0.35	0.0005-0.02	
	Cattari y Beyer, 2015					0.58	6.2			0.122		
	Magenes y Calvi, 1996				0.21	0.81	7.9 ± 20%					
Ladrillo hueco	Pérez-Gálvez <i>et al.</i> , 2009	1.69					1.6					
	Vignoli <i>et al.</i> , 2019	3.5-5.6	0.87-1.4	15			4-8			0.2-0.36		0.18-0.60
	Ministerio italiano de infraestructuras y transporte, 2018	1.12-1.4										

Donde: E es el módulo de elasticidad; G es el módulo de cortante; W es el peso específico; c es la cohesión; μ es el grado de rozamiento entre ladrillo y mortero; f_c es la resistencia a compresión; ϵ_{cp} es la deformación correspondiente a la resistencia pico en compresión; ϵ_{cu} es la deformación correspondiente a la resistencia última en compresión; f_t es la resistencia a tracción del muro; ϵ_t es la deformación correspondiente a la resistencia máxima en tracción; τ_0 es la resistencia diagonal del muro.

La resistencia característica a la compresión, f_k , se ha definido a través de la ecuación empírica (Eq. 7.1) establecida en el Eurocódigo-6 (EC6) (AENOR, 2013). K es una constante que depende del ladrillo y del mortero empleado y se obtiene según el EC6. En este caso, para arcilla cocida y mortero ordinario, se obtiene 0,35. El peso específico se ha seleccionado de acuerdo con el código de construcción de aplicación de este período, la normativa MV-201 (Ministerio de la Presidencia, 1972). Finalmente, los parámetros mecánicos específicos para el caso de estudio (tabla 7.2) se han definido de acuerdo al rango de variación de los valores para ambos tipos de ladrillo, a la planimetría disponible y al código de construcción vigente en ese período (la MV-201).

$$f_k = K f_b^{0.7} f_m^{0.3} \quad \text{Eq. 7.1}$$

Tabla 7.2. Propiedades mecánicas seleccionadas para el análisis numérico

Fábrica de ladrillo	$W = 18 \text{ kN/m}^3$	$f_c = 4.0 \text{ MPa}$	$f_{ck} = 1.14 \text{ MPa}$	$E = 1200 \text{ MPa}$	$G = 150 \text{ GPa}$
		$f_b = 3 \text{ MPa}$	$f_m = 4 \text{ MPa}$	$\tau_0 = 0.05 \text{ MPa}$	
		$\epsilon_{cp} = 0.008$	$\epsilon_{cu} = 0.008$	$\epsilon_t = 0.005$	
Hormigón armado	$W = 25 \text{ kN/m}^3$	$f_c = 25.5 \text{ MPa}$	$f_{ck} = 17.5 \text{ MPa}$	$E = 3000 \text{ GPa}$	$G = 17000 \text{ GPa}$
Acero para barras	$W = 78.6 \text{ kN/m}^3$	$f_y = 428 \text{ MPa}$	$f_{yk} = 400 \text{ MPa}$	$E = 210 \text{ GPa}$	$G = 800 \text{ GPa}$

Donde: f_{ck} es la resistencia característica a compresión; f_b es la resistencia a compresión del ladrillo; f_m es la resistencia a compresión del mortero; f_y es la resistencia a la tracción del acero; f_{yk} es la resistencia característica a la tracción del acero.

7.4. EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO SÍSMICO

7.4.1. Modelado numérico

El método de PE se basa en la idealización de las estructuras de muros como pórticos equivalentes. Para aplicar el método, numerosos trabajos de investigación se han centrado en el desarrollo de macro-elementos en conjunto con la aplicación de métodos mecánicos convencionales (Sepe *et al.*, 2014). En este trabajo se ha empleado este método para el modelado del comportamiento sísmico del edificio caso de estudio. Para ello, se han determinado los paneles verticales, *piers* y los horizontales, *spandrels*, así como las áreas rígidas donde no se producirá daño sísmico (Lagomarsino *et al.*, 2013).

Los mecanismos de fallo de los *piers* son a flexión y a cortante (figura 7.5). El primero está relacionado con el fallo tipo *rocking* o *crushing*. Estos se refieren al giro o aplastamiento excesivo del panel de fábrica y se pueden simular calculando la respuesta combinada del momento por flexión y la carga axial (N-M). El segundo está relacionado con el fallo *diagonal cracking* o

agrietamiento diagonal. Este se puede simular a través de leyes multilineales de esfuerzo cortante *vs.* deformación/desplazamiento ($V-\gamma$) o ($V-d$).

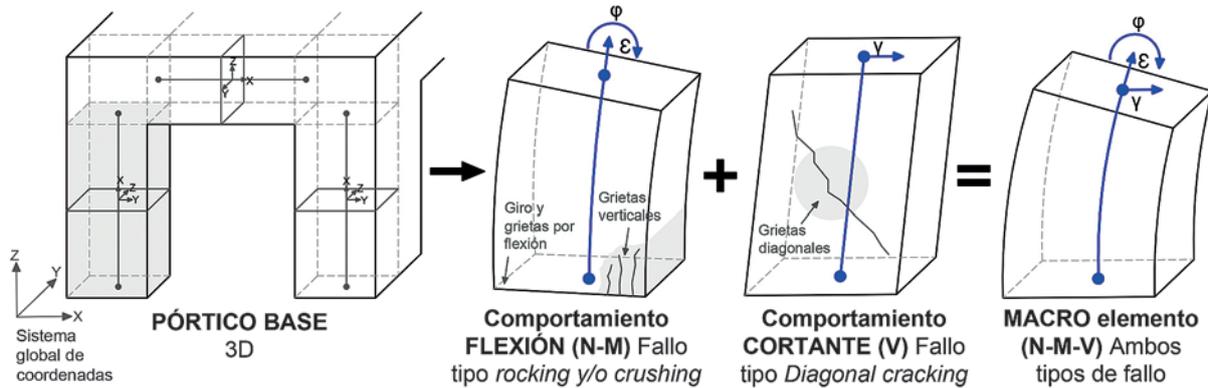


Figura 7.5. Comportamiento del macro-elemento y tipos de fallo

En este trabajo, los macroelementos se han modelado en el *software* OpenSees (McKenna *et al.*, 2000) y siguiendo un único enfoque de plasticidad, el de plasticidad distribuida a lo largo del elemento barra. Para ello, se han definido elementos tipo viga basados en la fuerza o *force-beam element*. La plasticidad o comportamiento no lineal se aplica longitudinalmente a través de fibras en las que se divide la sección transversal del panel, siguiendo las prescripciones establecidas en (Camata *et al.*, 2022; Raka *et al.*, 2015; Sepe *et al.*, 2014). La no linealidad de la mampostería se ha definido según la ley de tensión-deformación ($\sigma-\epsilon$) uniaxial aplicada a lo largo del elemento barra, empleando el material uniaxial denominado 'Concrete02' disponible en OpenSees. La curva de compresión se describe como se sugiere en Raka *et al.* (2015). El comportamiento a tracción se ha simulado siguiendo las ecuaciones propuestas por Belarbi y Hsu (1994) dividiendo la curva en dos ramas.

El fallo por cortante en edificios de muros de carga debido a la fisuración diagonal es difícil de describir y predecir (Calderini *et al.*, 2009). En este trabajo, la resistencia a cortante máxima de los paneles (V) se ha calculado según el famoso criterio de Turnšek y Čačovič (Turnšek y Čačovič, 1971). Este criterio es uno de los más precisos a la hora de determinar el fallo por fisuración diagonal o *diagonal cracking*. V se evalúa en función de la carga axial (N) que actúa en los paneles en cada paso del análisis. Durante los análisis y debido a los fenómenos de redistribución, N varía. Esta variación no se calcula automáticamente en OpenSees, en comparación con otros *software* de cálculo específicos para edificios de muros de carga. Para solventar este problema, y como se sugiere en Raka *et al.* (2015), en este trabajo se ha optado por establecer al inicio de los análisis el valor de N en función de las cargas gravitatorias aplicadas en los nodos. El resto de puntos negativos, n , y positivos, p , de la ley de cortante-deformación se definen según Raka *et al.* (2015). El pórtico de HA central se define empleando el material uniaxial 'Concrete02'. Para la determinación de los valores de la deriva de los muros se han empleado los valores diferenciados para los *spandrels* y los *piers* establecidos en Beyer *et al.* (2012). Los criterios seleccionados para la determinación del dominio de resistencia para cada tipo de panel y fallo se basan en lo establecido en la norma italiana (Ministerio italiano de infraestructuras y transporte, 2018).

7.4.2. Análisis estáticos no lineales

En este trabajo, los modelos numéricos se han desarrollado utilizando el *software* OpenSees. El pre/postprocesador STKO (Petraçca *et al.*, 2017) y el *software* MATLAB (The MathWorks Inc., 2018) se han utilizado para visualizar gráficamente y procesar los resultados obtenidos, respectivamente.

Se ha realizado un análisis estático no lineal con control de la carga sobre la estructura, considerando un patrón de cargas triangular. Este es el patrón de carga más restrictivo, que se calcula en función de las masas en cada planta y altura (Requena-Garcia-Cruz *et al.*, 2021). El objetivo de estos análisis es determinar la capacidad de la estructura, expresada como la curva de capacidad del sistema. Esta curva representa el cortante basal leído en la base de todos los elementos estructurales verticales frente al desplazamiento horizontal del nodo de control. El nodo de control se encuentra ubicado en el centro de masas de la planta superior. Los análisis se realizan en las dos direcciones horizontales y ortogonales principales del caso de estudio, X e Y.

7.4.3. Criterios para el análisis de la seguridad sísmica

Una vez obtenida la capacidad, se ha verificado la seguridad sísmica mediante el ratio capacidad-demanda. Este ratio se expresa como el desplazamiento debido al daño sísmico esperado dividido por el desplazamiento requerido según la demanda sísmica. En este trabajo, para la evaluación del daño sísmico, se ha considerado el estado límite de daño severo (DS), como sugiere el EC8. Para cumplir con la verificación de seguridad sísmica, la relación capacidad-demanda debe ser superior a 1.

El daño sísmico se ha evaluado considerando el estado de daño de prevención de daños por usabilidad (UPD), determinado específicamente para edificios de muros de muros de fábrica. Como en los edificios caso de estudio el comportamiento estructural tipo caja está garantizado por las conexiones horizontales, en este trabajo, no se tiene en cuenta la evaluación del fallo fuera del plano en la determinación de daños. Para calcular el UPD se ha seguido el criterio establecido en Cattari *et al.* (2018), que establece que el estado UPD se alcanza cuando: i) el 50% de los muros de mampostería presentan daños leves generalizados; ii) un muro de mampostería alcanza el 40% de caída de la $V_{máxima}$; iii) la consecución del 95% del cortante basal máximo de la estructura.

Para la evaluación de la demanda sísmica, los resultados obtenidos en el análisis estático no lineal se han empleado junto con el método N2 (Fajfar y Gašperšič, 1996) para así estimar el rendimiento o *performance* de la estructura. Este método puede conllevar un cierto nivel de imprecisión al aplicarse a este tipo de edificios. Por ello, se recomienda realizar análisis dinámicos no lineales y así comprobar los resultados obtenidos. Sin embargo, para este estudio, el método N2 y los análisis estáticos se han empleado como una evaluación sísmica inicial ya que los análisis dinámicos requieren un mayor nivel de precisión y de coste computacional que los estáticos.

7.5. ANÁLISIS PRELIMINAR DEL CASO DE ESTUDIO

7.5.1. Análisis modal

Los resultados del análisis modal obtenidos se muestran en la figura 7.6. Como se puede observar, los modos 1 y 2 son principalmente traslacionales en la dirección X (eje rojo) y en la dirección Y (eje verde), respectivamente. El modo 3 es rotacional en las direcciones X e Y, con un 30 % de participación de las masas en cada dirección.

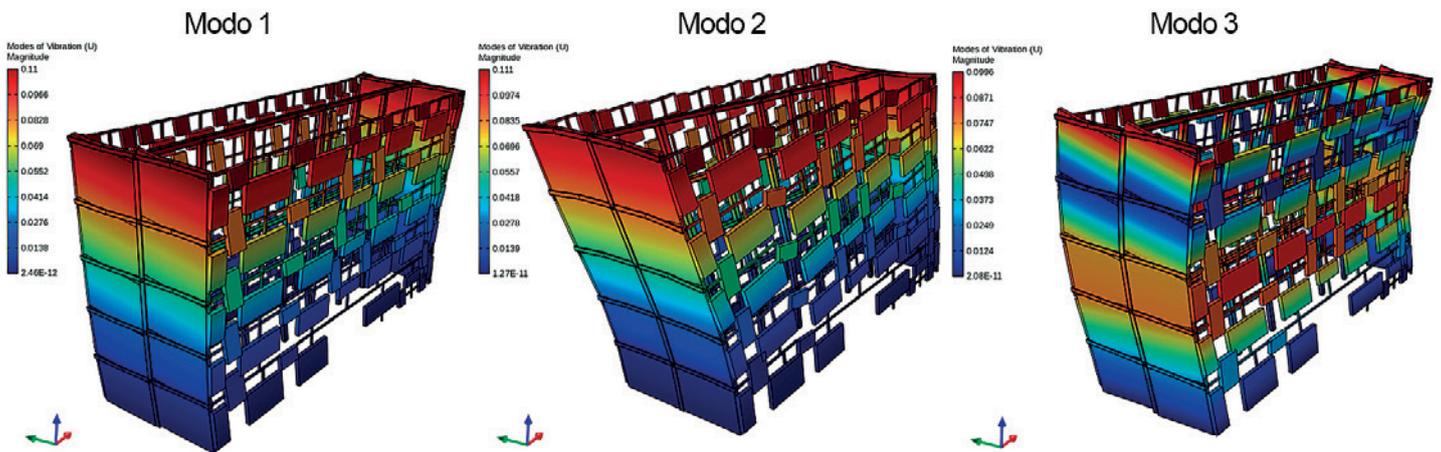


Figura 7.6. Modos de vibración del caso de estudio

7.5.2. Análisis del daño sísmico

Como se observa en la figura 7.7(a), el comportamiento del edificio en la dirección X es más frágil que en la dirección Y debido a la presencia de los muros de mampostería en la dirección X. Considerando la evaluación ratio demanda-capacidad, se obtiene que la edificación no cumplirá con la verificación de seguridad sísmica. Los ratios obtenidos para las direcciones X e Y han sido de 0,79 y 1,05, respectivamente. Los resultados de los análisis estáticos no lineales se han expresado en términos de curvas de capacidad de un solo grado de libertad (SDOF) normalizadas, dividiendo el cortante leído en la base (V_b) y el desplazamiento superior (d_{top}) por el peso total (W_t) y la altura (h_t) del edificio.

El daño sísmico esperado en cada muro de las fachadas principal y trasera para el paso de demanda sísmica se muestra en la figura 7.7(b). Se ha obtenido que los muros más afectados son los situados en planta baja. Los diferentes tipos de daños esperados se han calculado considerando los límites de deriva entre plantas a partir de las leyes constitutivas de cortante y flexión de cada panel.

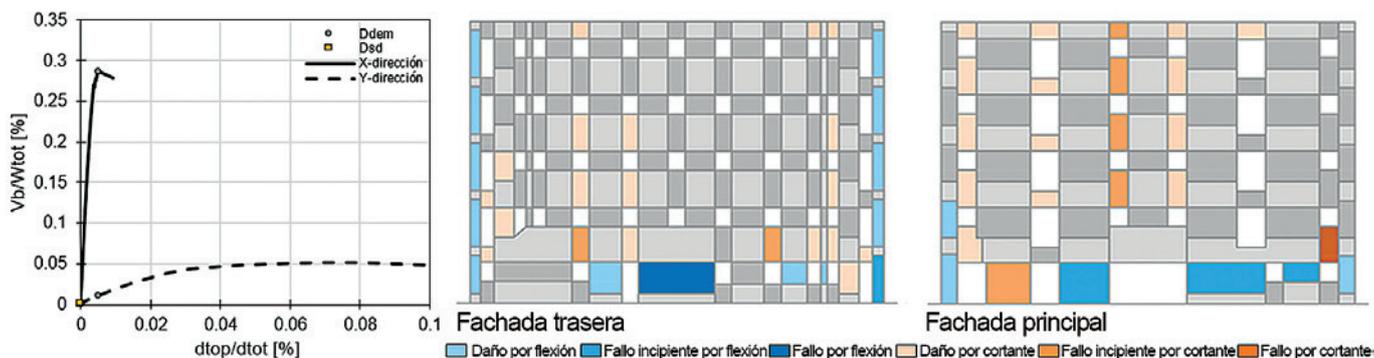


Figura 7.7. Curva de capacidad normalizada expresada en SDOF con la demanda sísmica y el daño sísmico esperados. Daño esperado para cada panel de las fachadas principal y trasera para el paso correspondiente a la demanda sísmica

7.6. CONCLUSIONES

La construcción de modelos fiables de PE es un aspecto clave en la evaluación sísmica de los edificios de muros de carga. Se han extraído varias conclusiones particulares del caso de estudio, en cada una de las escalas de análisis consideradas en este trabajo:

- El muro de la fachada principal presenta una mayor capacidad sísmica que la de la fachada posterior debido a la distribución de los huecos en fachada. La fachada trasera presenta *piers* estrechos y esbeltos, lo que conlleva a una mayor concentración de daños en los primeros pasos de los análisis estáticos no lineales mientras que la fachada principal no presenta este tipo de huecos.
- El edificio presenta una peor capacidad sísmica en la dirección X que en la dirección Y: su comportamiento es mucho más frágil en esta dirección que en la transversal. Esto se debe principalmente al predominio de muros de mampostería en la dirección X.
- Los daños se concentran principalmente en los paneles situados en planta baja.

7.7. REFERENCIAS

- Abrams, D. y Shah, N. (1992): *Cyclic Load Testing of Unreinforced Masonry Walls (Advance Construction Technology Center)*. <https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/ADA264241.pdf>
- AENOR (1998): *Eurocódigo 8: Proyecto de estructuras sismorresistentes. Parte 3: evaluación y adecuación sísmica de edificios (EC8-3)*. España. <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0060367>
- AENOR (2013): *Eurocódigo 6: Proyecto de estructuras de fábrica*. España. <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma/?c=N0052159>
- Angiolilli, M., Lagomarsino, S., Cattari, S. y Degli Abbatì, S. (2021): «Seismic fragility assessment of existing masonry buildings in aggregate», *Engineering Structures*, 247, 113218. <https://doi.org/10.1016/J.ENG-STRUCT.2021.113218>
- Anthoine, A. y Magonette, G. (1994): «Shear-compression testing and analysis of brick masonry walls», *Proceedings of the 10th European Conference on Earthquake Engineering*. https://www.researchgate.net/publication/303168220_Shear-compression_testing_and_analysis_of_brick_masonry_walls

- Belarbi, A. y Hsu, T. T. C. (1994): «Constitutive Laws of Concrete in Tension and Reinforcing Bars Stiffened By Concrete», *Structural Journal*, 91(4), 465-474. <https://doi.org/10.14359/4154>
- Beyer, K., Eeri, M. y Dazio, A. (2012): «Quasi-Static Cyclic Tests on Masonry Spandrels», *Earthquake Spectra*, 28(3), 907-929. <https://doi.org/10.1193/1.4000063>
- Calderini, C., Cattari, S. y Lagomarsino, S. (2009): «In-plane strength of unreinforced masonry piers», *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 38(2), 243-267. <https://doi.org/10.1002/eqe.860>
- Camata, G., Marano, C., Sepe, V., Spacone, E., Siano, R., Petracca, M., Roca, P. y Pela, L. (2022): «Validation of non-linear equivalent-frame models for irregular masonry walls», *Engineering Structures*, 253, 113755. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.113755>
- Cardinali, V., Castellini, M., Cristofaro, M. T., Lacanna, G., Coli, M., de Stefano, M. y Tanganelli, M. (2021): «Integrated techniques for the structural assessment of cultural heritage masonry buildings: application to Palazzo Cocchi-Serristori in Florence», *Journal of Cultural Heritage Management and Sustainable Development*, 13(1), 123-145. <https://doi.org/10.1108/JCHMSD-02-2021-0024>
- Cattari, S. y Beyer, K. (2015): «Influence of spandrel modelling on the seismic assessment of existing masonry buildings», *Proceedings of the Tenth Pacific Conference on Earthquake Engineering Building an Earthquake-Resilient Pacific*, January, 88-95.
- Cattari, S., Camilletti, D., D'Altri, A. M. y Lagomarsino, S. (2021): «On the use of continuum Finite Element and Equivalent Frame models for the seismic assessment of masonry walls», *Journal of Building Engineering*, 43(January), 102519. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102519>
- Cattari, S., Camilletti, D., Lagomarsino, S., Bracchi, S., Rota, M. y Penna, A. (2018): «Masonry Italian Code-Conforming Buildings. Part 2: Nonlinear Modelling and Time-History Analysis», *Journal of Earthquake Engineering*, 22(sup2), 2010-2040. <https://doi.org/10.1080/13632469.2018.1541030>
- Cattari, S., Lagomarsino, S., Bazzurro, A. y Porta, F. (2015): «Critical review of analytical models for the in-plane and out-of-plane assessment of URM buildings», *2015 NZSEE Conference*, 111, 1-10.
- Corradi, M., Borri, A. y Vignoli, A. (2003): «Experimental study on the determination of strength of masonry walls», *Construction and Building Materials*, 17, 325-337. [https://doi.org/10.1016/S0950-0618\(03\)00007-2](https://doi.org/10.1016/S0950-0618(03)00007-2)
- Degli Abbati, S., Morandi, P., Cattari, S. y Spacone, E. (2021): «On the reliability of the equivalent frame models: the case study of the permanently monitored Pizzoli's town hall», *Bulletin of Earthquake Engineering*, 1-31. <https://doi.org/10.1007/s10518-021-01145-6>
- Dolatshahi, K. M., Nikoukalam, M. T. y Beyer, K. (2018): «Numerical study on factors that influence the in-plane drift capacity of unreinforced masonry walls», *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 47(6), 1440-1459. <https://doi.org/10.1002/eqe.3024>
- Fagundes, C., Bento, R. y Cattari, S. (2017): «On the seismic response of buildings in aggregate: Analysis of a typical masonry building from Azores», *Structures*, 10, 184-196. <https://doi.org/10.1016/J.ISTRUC.2016.09.010>
- Fajfar, P. y Gašperšič, P. (1996): «The N2 method for the seismic damage analysis of RC buildings», *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 25(1), 31-46.
- Funari, F., da Silva, L. C. M. y Milani, G. (2022): «A FE-Based Macro-Element for the Assessment of Masonry Structures: Linear Static, Vibration, and Non-Linear Cyclic Analyses», *Applied Sciences* 2022, 12(3), 1248. <https://doi.org/10.3390/APP12031248>
- Krishnachandran, S. y Menon, A. (2021): «A Normative Framework for Assessment and Retrofit of Existing Unreinforced Masonry Buildings in India», *Journal of The Institution of Engineers (India): Series A*, 102(2), 369-387. <https://doi.org/10.1007/s40030-021-00512-5>
- Lagomarsino, S., Cattari, S. y Ottonelli, D. (2021): «The heuristic vulnerability model: fragility curves for masonry buildings», *Bulletin of Earthquake Engineering*, 19 (8), 3129-3163. <https://doi.org/10.1007/s10518-021-01063-7>
- Lagomarsino, S., Penna, A., Galasco, A. y Cattari, S. (2013): «TREMURI program: An equivalent frame model for the nonlinear seismic analysis of masonry buildings», *Engineering Structures*, 56, 1787-1799. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2013.08.002>

- Magenes, G. y Calvi, G. M. (1996): «In-plane seismic response of brick masonry walls», *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 26, 1091-1112.
- Malomo, D. y DeJong, M. J. (2021): «A Macro-Distinct Element Model (M-DEM) for simulating the in-plane cyclic behavior of URM structures», *Engineering Structures*, 227, 111428. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111428>
- Manzini, C. F., Ottonelli, D., Abbati, S. D., Marano, C. y Cordasco, E. A. (2020): «Modelling the seismic response of a 2-storey URM benchmark case study: comparison among different equivalent frame models», *Bulletin of Earthquake Engineering, SI: URM no.* <https://doi.org/10.1007/s10518-021-01173-2>
- McKenna, F., Fenves, G. L. y Scott, M. H. (2000): *OpenSees: Open system for earthquake engineering simulation. Pacific Earthquake Engineering Research Center. University of California. Estados Unidos.* <https://opensees.berkeley.edu/>
- Milosevic, J., Cattari, S. y Bento, R. (2020): «Definition of fragility curves through nonlinear static analyses: procedure and application to a mixed masonry-RC building stock», *Bulletin of Earthquake Engineering*, 18(2), 513-545. <https://doi.org/10.1007/s10518-019-00694-1>
- Ministerio de Fomento de España (2002): *Norma de Construcción Sismorresistente de Edificación.* España. https://www.mitma.gob.es/recursos_mfom/0820200.pdf
- Ministerio de Fomento de España (2012): *Actualización de mapas de peligrosidad sísmica de España.* España. <https://www.ign.es/resources/acercaDe/libDigPub/ActualizacionMapasPeligrosidadSismica2012.pdf>
- Ministerio de la Presidencia (1972): *Norma MV 201/72. Muros Resistentes de Fábrica de Ladrillo.* España. <https://www.boe.es/boe/dias/1972/05/31/pdfs/A09594-09624.pdf>
- Ministerio italiano de infraestructuras y transporte (2018): *Istruzioni per l'applicazione dell'«Aggiornamento delle "Norme tecniche per le costruzioni"» di cui al decreto ministeriale 17 gennaio 2018 (Circular 21/1/19, No. 7 C.S.LL.PP).* Italia. <https://www.gazzettaufficiale.it/eli/gu/2018/02/20/42/so/8/sg/pdf>
- Morandini, C., Malomo, D. y Penna, A. (2022): «Equivalent frame discretisation for URM façades with irregular opening layouts», *Bulletin of Earthquake Engineering*, 1-30. <https://doi.org/10.1007/s10518-022-01315-0>
- NZSEE (2006): *Assessment and improvement of the structural performance of buildings in earthquake. Recommendations of a NZSEE Project Technical Group (including Revision of Section 10 available online from April 2015).* Nueva Zelanda.
- Orakcal, K., Massone, L. M. y Wallace, J. W. (2006): *Analytical Modeling of Reinforced Concrete Walls for Predicting Flexural and Coupled-Shear-Flexural Responses* Kutay Orakcal.
- Panto, B., Cannizzaro, F., Calió, I. y Lourenço, P. B. (2017): «Numerical and Experimental Validation of a 3D Macro-Model for the In-Plane and Out-Of-Plane Behavior of Unreinforced Masonry Walls», *International Journal of Architectural Heritage*, 11(7), 946-964. <https://doi.org/10.1080/15583058.2017.1325539>
- Pavanetto, M., Sbrogió, L., Salvalaggio, M. y Valluzzi, M. R. (2020): «Equivalent frame modelling of an unreinforced masonry building in finite element environment», *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, 2, 20062021. https://doi.org/10.1007/978-3-030-41057-5_160
- Penna, A., Lagomarsino, S. y Galasco, A. (2014): «A nonlinear macroelement model for the seismic analysis of masonry buildings», *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 43(2), 159-179. <https://doi.org/10.1002/eqe.2335>
- Pérez-Gálvez, F., Rodríguez-Liñán, C. y Rubio, P. (2009): «Determination of the mechanical characteristics of masonry walls of the traditional housing in Sevilla between 1700 and 1900», *Informes de La Construcción*, 61(514), 19-28. <https://doi.org/10.3989/IC.06.001>
- Peruch, M., Spacone, E. y Camata, G. (2019): «Nonlinear analysis of masonry structures using fiber-section line elements», *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 48(12), 1345-1364. <https://doi.org/10.1002/eqe.3188>
- Petracca, M., Candeloro, F. y Camata, G. (2017): «*STKO user manual*», *ASDEA Software Technology.* Italia. <https://asdeasoft.net/pdf/STKOUUserManual.pdf>

- Raka, E., Spacone, E., Sepe, V. y Camata, G. (2015): «Advanced frame element for seismic analysis of masonry structures: model formulation and validation», *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 44(14), 2489-2506. <https://doi.org/10.1002/eqe.2594>
- Requena-García-Cruz, M. V., Morales-Esteban, A. y Durand-Neyra, P. (2021): «Optimal ductility enhancement of RC framed buildings considering different non-invasive retrofitting techniques», *Engineering Structures*, 242, 112572. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112572>
- Sepe, V., Spacone, E., Raka, E. y Camata, G. (2014): «Seismic analysis of masonry buildings: equivalent frame approach with fiber beam elements», *9th International Conference on Structural Dynamics, EUROODYN*, 237-244.
- Sharma, S., Silva, L. C., Graziotti, F., Magenes, G. y Milani, G. (2021): «Modelling the experimental seismic out-of-plane two-way bending response of unreinforced periodic masonry panels using a non-linear discrete homogenized strategy», *Engineering Structures*, 242, 112524. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112524>
- Siano, R., Roca, P., Camata, G., Pela, L., Sepe, V., Spacone, E. y Petracca, M. (2018): «Numerical investigation of non-linear equivalent-frame models for regular masonry walls», *Engineering Structures*, 173, 512-529. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.07.006>
- Simões, A. G., Bento, R., Lagomarsino, S., Cattari, S. y Lourenço, P. B. (2021): «Fragility Functions for Tall URM Buildings around Early 20th Century in Lisbon. Part 1: Methodology and Application at Building Level», *International Journal of Architectural Heritage*, 15(3), 349-372. <https://doi.org/10.1080/15583058.2019.1618974>
- Sorrentino, L., Cattari, S., da Porto, F., Magenes, G. y Penna, A. (2019): «Seismic behaviour of ordinary masonry buildings during the 2016 central Italy earthquakes», *Bulletin of Earthquake Engineering*, 17(10), 5583-5607. <https://doi.org/10.1007/s10518-018-0370-4>
- S.T.A. DATA (2018): *3Muri* (11.5). Italia. <https://www.3muri.com/en/>
- The MathWorks Inc. (2018): *MATLAB and Statistics Toolbox Release 2018b*. Estados Unidos. <https://www.mathworks.com/products/statistics.html>
- Tomić, I., Vanin, F. y Beyer, K. (2021): «Uncertainties in the Seismic Assessment of Historical Masonry Buildings», *Applied Sciences* 2021, 11(5), 2280. <https://doi.org/10.3390/AP11052280>
- Turnšek, V. y Čačovič, F. (1971): «Some Experimental Results on the Strength of Brick Masonry Walls», *Proc. of the Second International Brick Masonry Conference*, 149-156.
- Vignoli, A., Boschi, S. y Signorini, N. (2019): *Abaco delle murature della regione toscana. Protocolli di prova*. <https://www.regione.toscana.it/-/abaco-delle-murature-della-regione-toscana>

8

Análisis del comportamiento energético en barriadas del siglo XX en clima mediterráneo. Aplicación en El Plantinar

Julia Díaz-Borrego*, Ignacio Acosta*, Miguel Ángel Campano* y
Jésica Fernández-Agüera*

* *Departamento de Construcciones Arquitectónicas I
Universidad de Sevilla*

RESUMEN

En España, el consumo energético del parque de viviendas supone más del 20% del consumo total del país, siendo cada vez mayor. Esto se debe, en gran medida, al envejecimiento de las edificaciones residenciales. Alrededor del 90% fueron construidas con anterioridad a la aparición de las regulaciones de eficiencia en los edificios. El bajo rendimiento del parque residencial se agrava en Andalucía, donde la cantidad de energía necesaria para alcanzar condiciones de confort aceptables ponen de manifiesto la escasa eficiencia energética de las viviendas. Las principales estrategias para reducir la demanda energética y mejorar las condiciones de confort interior son, principalmente, la mejora del comportamiento térmico de la envolvente y la renovación de ventanas. No obstante, para optimizar los esfuerzos económicos y materiales de la rehabilitación, se precisa llevar a cabo una rigurosa caracterización del comportamiento energético de los edificios. Dicha caracterización se basa principalmente en ensayos *in situ* que caracterizan los parámetros definitivos del comportamiento energético de los edificios: termografía, medición de la transmitancia térmica de los cerramientos y análisis de estanqueidad. Asimismo, la modelización computacional permite predecir el comportamiento energético del edificio, definiendo los complejos intercambios energéticos entre que tienen lugar entre la edificación y los múltiples factores externos.

El presente capítulo de libro pretende arrojar luz acerca de los diferentes métodos a implementar en la caracterización energética de barriadas del siglo XX en el clima mediterráneo. Apoyándose en El Plantinar, Sevilla, como barriada objeto de estudio, se analizan los resultados de los diferentes métodos de caracterización.

Llevar a cabo análisis complementarios que aúnen pruebas *in situ* (térmicas, de transmitancia y estanqueidad), junto a estudios computacionales, con datos de entrada basados en los medidos, para el estudio pormenorizado de demanda y consumo energético de las viviendas, favorece la planificación de las actuaciones de rehabilitación que puedan llevarse a cabo con posterioridad.

8.1. INTRODUCCIÓN

Una gran parte del parque de viviendas existente en la Unión Europea (UE) está alcanzando su vida nominal, lo que provoca una importante degradación de sus elementos estructurales y no estructurales, así como de sus materiales constructivos. A esto se suma que el 80 % del parque europeo de edificios residenciales se construyó antes de la aplicación de normas restrictivas (Ibáñez Iralde *et al.*, 2021), quedando obsoletos e incumpliendo los requisitos modernos en términos de eficiencia energética y confort (Menna *et al.*, 2021).

En este contexto, la UE aprobó el Green Deal para lograr la neutralidad climática en 2050, estableciendo programas de rehabilitación de edificios residenciales para mejorar la eficiencia energética, centrándose en la reducción del riesgo de pobreza energética. Además, la nueva normativa de la UE para la gestión del consumo de energía y las emisiones tiene como objetivo mejorar la eficiencia energética al menos en un 32,5 % para 2030 (European Parliament, 2019). En el caso de España, el programa nacional PRE5000 tiene como objetivo promover la rehabilitación energética para, en última instancia, reducir el consumo de energía y las emisiones de carbono del parque de edificios. En el marco del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia de España, estas actividades de rehabilitación energética están financiadas por el fondo UE-Nueva Generación.

En España, el consumo energético de los edificios residenciales representa alrededor del 20 % del consumo total del país y ha ido creciendo de forma constante en los últimos años (Domínguez *et al.*, 2012). Además, en España, el 93 % de los edificios residenciales se construyeron antes de la primera Directiva nacional de Eficiencia Energética de los Edificios y solo el 0,3 % de los edificios residenciales existentes han sido rehabilitados energéticamente (Ibáñez Iralde *et al.*, 2021). El bajo rendimiento de los edificios residenciales se agrava en Andalucía, donde la gran cantidad de energía necesaria para alcanzar unas condiciones de confort aceptables y sus correspondientes emisiones de CO₂ señalan la escasa eficiencia energética de estos edificios (IDAE, 2011). Esto se debe principalmente a la falta de aislamiento en la envolvente (fachadas y cubiertas principalmente), al bajo rendimiento de los sistemas de climatización y a las pérdidas por infiltraciones.

Por todo ello, para llevar a cabo rehabilitaciones óptimas del parque de viviendas afectado, se precisa llevar a cabo una rigurosa caracterización del comportamiento energético de los edificios. Dicha caracterización se basa principalmente en ensayos *in situ*, destacando las siguientes pruebas diagnósticas: ensayos termográficos (termografía infrarroja), medición de la transmitancia térmica (U) de los cerramientos en contacto con el exterior y prueba de estanqueidad al aire (test de infiltraciones mediante *Blower Door*).

8.1.1. Termografía Infrarroja

La termografía infrarroja es la ciencia de adquisición y análisis de la información térmica (temperatura, gradientes térmicos, ...) obtenida mediante los dispositivos de adquisición de imágenes térmicas a distancia. (Sendra *et al.*, 2011)

El análisis termográfico para la evaluación de la envolvente de los edificios se realiza según la norma UNE-EN 13187:1998 Prestaciones térmicas de edificios. Detección cualitativa de irregula-

ridades en cerramientos de edificios. Método de infrarrojos (ISO 6781:1983 Modificada). Los ensayos termográficos tienen por objetivo analizar la envolvente térmica de los edificios, así como el comportamiento térmico entre las diferentes fachadas del edificio, y localizar las posibles vías de infiltración de aire.

8.1.2. Ensayo de Transmitancia (U)

El ensayo de transmitancia térmica (U) de la envolvente consiste en establecer, mediante un ensayo de temperaturas, el valor característico real U de los paramentos sobre los que se lleva a cabo. Para ello, es necesario conocer la temperatura ambiente exterior, la temperatura superficial de la cara interior del paramento y la del ambiente exterior.

Para medir dichas temperaturas, los aparatos de medida mayormente usados son sondas de temperatura y termopares.

La normativa de aplicación que regula la ejecución de dicho ensayo es la UNE-EN_ISO 6946 Elementos y componentes de la edificación. Resistencia y transmitancia térmica. Método de Cálculo.

8.1.3. Ensayos de estanqueidad

El nivel de hermeticidad de los edificios afecta significativamente al consumo energético y a las temperaturas interiores de las viviendas. La finalidad de estos ensayos es conocer el grado de estanqueidad de la envolvente del edificio, y el impacto asociado al confort en el interior del mismo debido a las infiltraciones incontroladas de aire con condiciones de temperatura no adecuadas (Sherman, 1994).

El presurizador/despresurizador de recintos (Blower Door) cuenta con el reconocimiento de la comunidad científica para llevar a cabo estos ensayos (Feustel, 1990). La Blower Door es una puerta estanca que cuenta con una caja de ventilación y manómetros diferenciales incorporados.

La prueba consiste en someter al recinto objeto de estudio, a estados de presurización (sobrepresión mediante la introducción de aire en el recinto) o despresurización (depresión extrayendo aire del mismo), hasta alcanzar una presión constante, positiva o negativa, de 50 Pa, y registrando el flujo de aire que está siendo introducido (o extraído) en ese momento, V_{50} (Campano Laborda, 2015), así como la tasa de infiltración de aire a 50 Pa, n_{50} . Durante dicho proceso, todas las puertas y ventanas deben permanecer cerradas (figura 8.1).

Para localizar los puntos de la envolvente de entrada o salida de aire en forma de infiltraciones, se requiere el empleo de anemómetros y sistemas de termografía infrarroja mientras se llevan a cabo los ensayos de estanqueidad.

Los ensayos de estanqueidad se rigen según el procedimiento de medida recogido en las normas UNE-EN 13829:2000 e ISO 9972:2006.

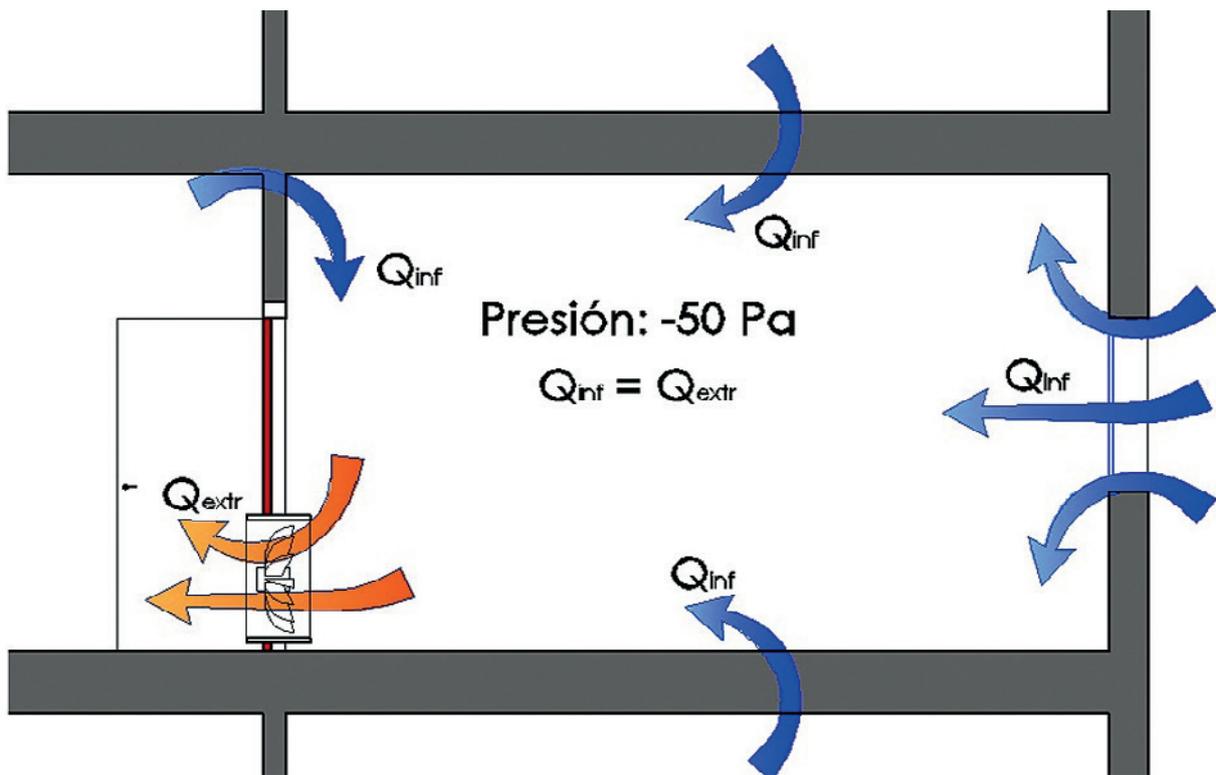


Figura 8.1. Realización de ensayo de despresurización en un recinto (Campano Laborda, 2015)

Asimismo, se han desarrollado modelos predictivos para estimar el grado de hermeticidad o estanqueidad en los edificios de viviendas en el área mediterránea. Dichos modelos se basan en parámetros básicos y de fácil acceso relacionados con las características arquitectónicas y el período de construcción de los edificios: severidad invernal, grado de exposición de la envolvente y tipo de fachada, entre otros; para la predicción y definición del valor de las tasas de infiltraciones n_{50} en los edificios (Fernández-Agüera *et al.*, 2019).

8.2. APLICACIÓN EN EL PLANTINAR: ANÁLISIS DE COMPORTAMIENTO ENERGÉTICO

8.2.1. Caracterización constructiva

La configuración de la envolvente (tabla 8.1) responde a la representativa de los barrios construidos entre la década de los 60 y los 70 en Andalucía. Se caracteriza por su simplicidad constructiva, por la ausencia de aislamiento térmico en la envolvente y por los consecuentes puentes térmicos especialmente localizados en los frentes de forjados, contornos de carpinterías, elementos estructurales en fachadas (pilares) y encuentros de paramentos verticales. Las aberturas están constituidas, por lo general, por dos hojas correderas con carpintería de aluminio sin rotura de puente térmico (RPT) y acristalamiento constituido por vidrio sencillo y persiana exterior.

Tabla 8.1. Caracterización constructiva de los edificios. Julia Díaz-Borrego

	Composición	Transmitancia U (W/m ² K)	Factor Solar
Fachada	Mortero de cemento (2 cm); un pie de ladrillo métrico tipo gafa (24 cm); enlucido de yeso (1 cm)	1.74	–
Fachada de Planta Baja	Pie y medio de ladrillo macizo (36 cm); enlucido de yeso (1 cm)	1.54	–
Forjado	Solería de terrazo (2 cm); mortero de cemento (3 cm); forjado unidireccional de bovedillas cerámicas (25 cm); enlucido de yeso (1.5 cm)	1.57	–
Cubierta	Solado de ladrillo prensado (0.8 cm); mortero de cemento (1.5 cm); solería perdida (0.8 cm); formación de pendiente con carbonilla (mean 5 cm); forjado unidireccional de bovedillas cerámicas (25 cm); enlucido de yeso (1.5 cm)	1.59	–
Forjado Planta Baja	Solería de terrazo (2 cm); mortero de cemento (3 cm); losa maciza de hormigón (15 cm)	1.24	–
Ventanas	Carpintería de aluminio sin RPT; vidrio sencillo (6 mm)	5.70	0.83

8.2.2. Caracterización del comportamiento energético de los edificios

Termografía Infrarroja

En este proyecto se ha llevado a cabo el análisis termográfico para la evaluación de la envolvente en uno de los bloques de la barriada y, específicamente en una de las viviendas de dicho bloque, situada en planta baja (figura 8.2). El inmueble objeto de estudio es el Bajo derecha. El estado de conservación es el propio de una edificación de esta antigüedad y características, si bien se realizó una pequeña actuación de reforma en el año 1985, según consta en la información catastral, apareciendo, en el plano i.3.4 de PGOU, con estado de conservación de la edificación como «Necesita conservación».

En él se empleó una cámara termográfica de marca y modelo Flir E85, para la identificación de problemas y/o defectos constructivos (puentes térmicos, humedades, etc.) a través de distintas radiaciones infrarrojas, y un termohigrómetro Flir MR77, para determinar la humedad y temperatura ambiental y de paramentos (tabla 8.2).

Conforme a los requisitos generales de la prueba contenidos en el apartado 6.1 de la norma UNE-EN 13187:1998, la inspección se ha realizado de forma que la diferencia de temperatura a través de la envolvente ha sido lo suficientemente grande como para permitir la detección de irregularidades térmicas. Para facilitar la interpretación, el examen termográfico se ha llevado a cabo con diferencias constantes de temperatura y presión en toda la envolvente. Esto implica



Figura 8.2. Ubicación del edificio objeto de estudio en la barriada de El Plantinar. Julia Díaz-Borrego

que la prueba se ha llevado a cabo en condiciones en las que la temperatura del aire exterior o interior no ha variado considerablemente, ni se ha producido exposición a la radiación solar directa o a rachas de viento o cualquier variación que pueda distorsionar el resultado y la interpretación de los valores obtenidos.

El tipo de inspección realizada se corresponde con un informe completo. Con el objetivo de definir los requisitos de prueba presentes, y en particular el apartado de envolvente del edificio (exteriores e interiores) desde donde se va a realizar el examen termográfico, se han considerado los siguientes factores:

- Los materiales superficiales son ladrillo pintado, morteros y yesos pintados. El valor de emisividad medio tomado para realizar las lecturas cualitativas ha sido de 0,95.
- Se inicia la inspección a las 7 de la mañana con el fin de garantizar que en las últimas 12 horas la edificación no ha recibido radiación directa. Durante la inspección se registra la temperatura ambiental que se sitúa en el rango entre 11,2 °C y 13,7 °C durante toda la prueba.
- Durante la inspección no llovía y la fuerza del viento era 0 según la escala Beaufot.
- La temperatura media interior era de 24,1 °C. Debido a las temperaturas medias en los días disponibles para la inspección, se solicitó a la propiedad que mantuviera los recintos a inspeccionar a una temperatura lo más alta posible mediante los sistemas de calefacción.

Tabla 8.2. Equipos empleados en el análisis termográfico de este estudio

CÁMARA TERMOGRÁFICA	
Detección e identificación de problemas/defectos constructivos (aislamientos, humedades, etc.) a través de distintas radiaciones infrarrojas. Método de inspección no invasivo.	
MARCA. MODELO	Flir E85
Nº SERIE	78501535
SENSIBILIDAD	< a 0.04 °C
RANGO TEMPERATURA	-20°C a 120°C
RESOLUCIÓN	384x288 píxeles
	
TERMOHIGRÓMETRO	
Determinación de humedad y temperatura tanto de ambiente como en paramentos.	
MARCA. MODELO	Flir MR77
FUNCIONES	H. relativa / Temperatura ambiente
SENSIBILIDAD	Hasta 19mm bajo la superficie
CONECTIVIDAD	Bluetooth con la cámara termográfica
	

Se tomaron imágenes infrarrojas a intervalos controlados de tiempo, con objeto de ver la evolución temporal de las pérdidas de calor que se iban produciendo. Los puntos analizados fueron las carpinterías de huecos en fachadas, las puertas, los pasos de instalaciones y las rejillas de ventilación.

En relación a las imágenes termográficas, los mapas de falso color de las termografías se muestran para maximizar la información sobre las variaciones térmicas de la envolvente, con independencia de que dicha escala sea coincidente entre imágenes, ya que, si lo fueran, se perdería información en dichos mapas de falso color. Por su parte, cada imagen va acompañada por una escala gráfica en función de las temperaturas máximas y mínimas de la imagen analizada.

De dicho análisis cabe destacar los siguientes comentarios:

- En la fachada lateral del edificio se identifica la posición de pilares y vigas por donde se está perdiendo energía. Las esquinas están formadas por el encuentro del muro de carga y el cerramiento y no se aprecia discontinuidad térmica. Destaca una línea horizontal en la planta primera, a 1 m del forjado. Esta discontinuidad se repite en el resto de los bloques del entorno sin que se haya identificado constructivamente (ver figura 8.3).
- Los muros de carga presentan una mayor resistencia térmica que los cerramientos laterales (ver figura 8.3).
- En los bordes de los balcones se puede apreciar la discontinuidad de los bordes que indica la presencia de fisuras, desprendimientos y corrosión del armado de borde (ver figura 8.4).
- El contorno del hueco que forma la ventana presenta una mayor pérdida energética que la continuidad del muro (ver figura 8.4).



Figura 8.3. Termogramas tomados durante la inspección

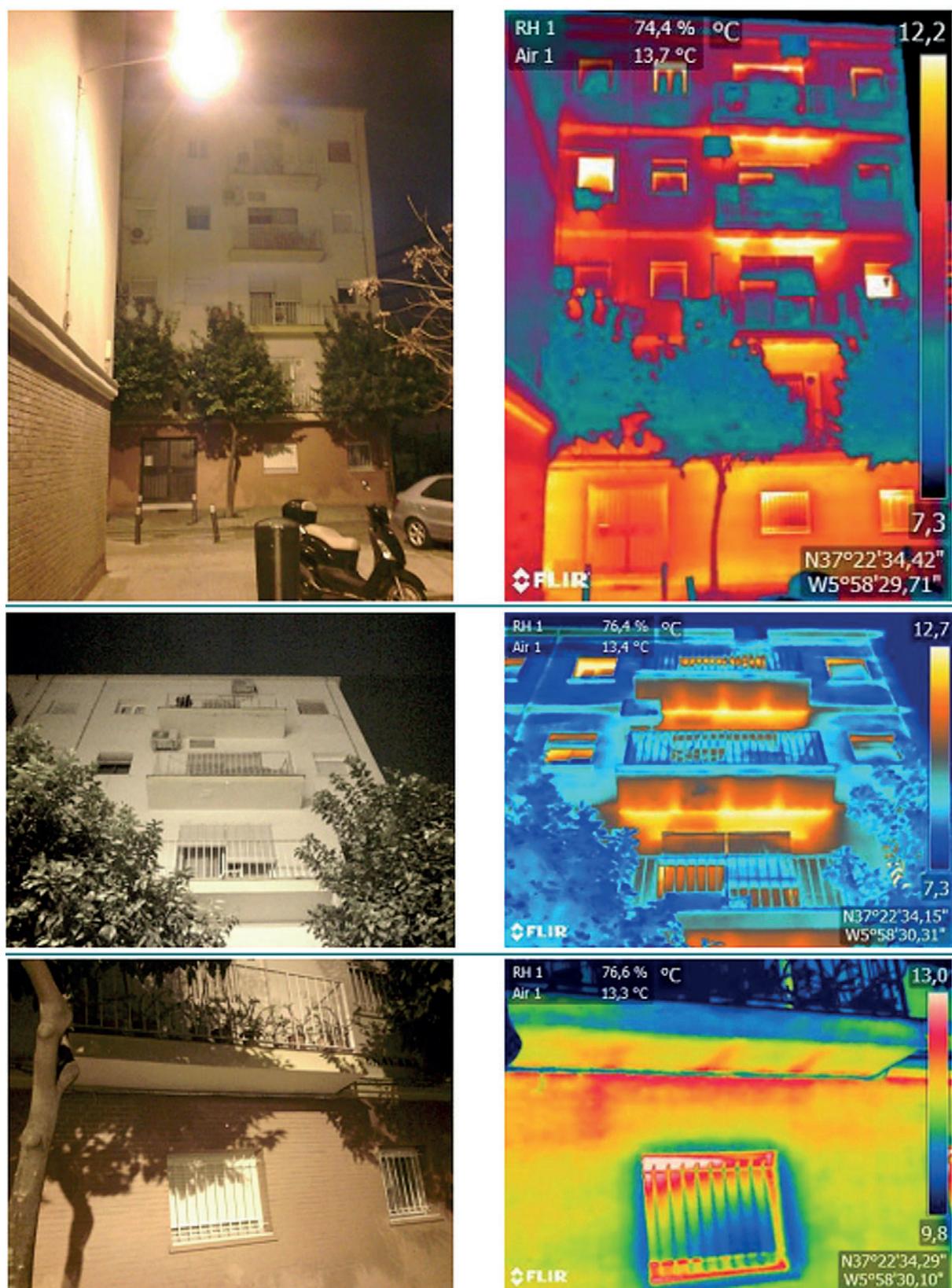


Figura 8.4. Termogramas tomados durante la inspección

No existen anomalías térmicas significativas en la envolvente, siendo los puntos más destacados los cantos de forjados, pilares y contorno de carpinterías.

Modelo predictivo de hermeticidad de los edificios

El nivel de hermeticidad de los edificios afecta significativamente al consumo energético y a las temperaturas interiores de las viviendas. En este trabajo se ha calculado la predicción y definición del valor n_{50} (tasa de infiltración de aire a 50 Pa) en los edificios según Fernández-Agüera *et al.* (2019). Se ha utilizado la ecuación resultante del modelo de predicción desarrollado para definir la hermeticidad de los edificios plurifamiliares en la región mediterránea. En este caso, se ha considerado el modelo 2 (cálculo de la hermeticidad en viviendas construidas antes de 1979):

$$n_{50} = \alpha + \gamma_A \cdot A + \beta_{WB} + \beta_M + \beta_F + \beta_{TE} + \beta_{WS} \quad \text{Eq. 8.1}$$

donde α es una constante con valor 3.607; γ_A un coeficiente con valor 0.048; A el área del recinto; β_{WB} un coeficiente dependiente de la existencia o no de ventanas en los baños; β_M un coeficiente dependiente de la existencia o no de ventanas; β_F un coeficiente dependiente del tipo de fachada (composición constructiva); β_{TE} un coeficiente dependiente de la exposición de la envolvente; β_{WS} un coeficiente dependiente de la severidad invernal.

Como resultado, se ha obtenido un valor n_{50} de 9,6 para el estado actual del edificio. Este valor está en concordancia con las medidas tomadas en diferentes estudios realizados en edificios de similares características en Sevilla (Fernández-Agüera *et al.*, 2019). El modelo computacional EnergyPlus™ del edificio se valida comparando y calibrando estos resultados simulados con los valores medidos experimentalmente en una campaña exhaustiva previa realizada en la región de Andalucía (en viviendas sociales de similares características), en el marco del proyecto regional Eficacia (Domínguez *et al.*, 2012; León *et al.*, 2012).

8.2.3. Modelado del comportamiento energético de los edificios

Al igual que los ensayos *in situ* nos permiten describir la caracterización energética real de un edificio, la simulación computacional nos permite conocer y predecir el comportamiento energético (demanda/consumo energético, puentes térmicos...) del edificio frente a posibles futuras modificaciones.

El comportamiento energético de un edificio no depende exclusivamente de las características técnicas y constructivas del propio edificio, sino de numerosos factores externos. Por ello, para definir dichos intercambios de energía se requiere de herramientas potentes de simulación energética (Sendra *et al.*, 2011).

Las prestaciones térmicas y de iluminación del edificio, así como su consumo energético, se ven afectadas por los procesos de intercambio de energía que tienen lugar entre la envolvente y su entorno (Yang *et al.*, 2012). Como demuestra Ratti *et al.* (2005), el entorno urbano es uno de los factores que más afecta al rendimiento energético final del edificio. De hecho, puede afectar al consumo energético hasta en un $\pm 10\%$. Del mismo modo, Rodrigues *et al.* (2015) comprobaron

que el rendimiento del edificio depende, en gran medida, de su posición con respecto a su entorno urbano. Los autores señalaron que el entorno urbano tiene un efecto directo en las cargas de climatización del edificio. Por lo tanto, es esencial tener en cuenta la configuración urbana del entorno para obtener el verdadero potencial de ahorro energético que se puede conseguir (Mangan *et al.*, 2021). En los análisis detallados, las diferentes orientaciones de las fachadas y los análisis de ahorro energético por vivienda darán como resultado actuaciones optimizadas en términos de ahorro material, medioambiental y económico en comparación con las soluciones de envolvente única y uniforme (Domínguez *et al.*, 2012).

Por su parte, el factor más influyente en el consumo energético de los edificios residenciales es la energía invertida en climatización (calefacción y refrigeración). Esta representa el 47,8% del consumo total de energía anual en los hogares españoles (IDAE, 2011). Centrándonos en el parque de vivienda del siglo XX en Andalucía, estos se caracterizan por un nivel económico generalmente bajo de los residentes. Esto significa que estas viviendas no presentan sistemas integrados de climatización. En su lugar, suelen contar con sistemas poco eficientes cuya relación consumo energético/beneficio de confort no es óptima. Por ello, el control de la demanda energética resultante de la transferencia a través de la envolvente es la medida más eficaz para reducir el consumo térmico asociado a la climatización residencial (Domínguez *et al.*, 2012).

Modelización computacional

Los modelos para la simulación del comportamiento energético se han generado y evaluado utilizando el *software* técnico denominado CYPE. En primer lugar, se ha utilizado el plugging IFC Builder, para crear el modelo IFC del edificio. A continuación, se ha utilizado el CYPETHERM HE plus (CTE, 2019) (Versión 9.5), herramienta computacional basada en el cálculo validado EnergyPlus™ y reconocida por el Ministerio español, para obtener el comportamiento de la demanda energética anual actual. Se han realizado diferentes variaciones del modelo de simulación energética para tener en cuenta las estrategias de rehabilitación propuestas. El modelo desarrollado en el *software* se muestra en la figura 8.5, donde se pueden observar tanto las fachadas principales como las posteriores.

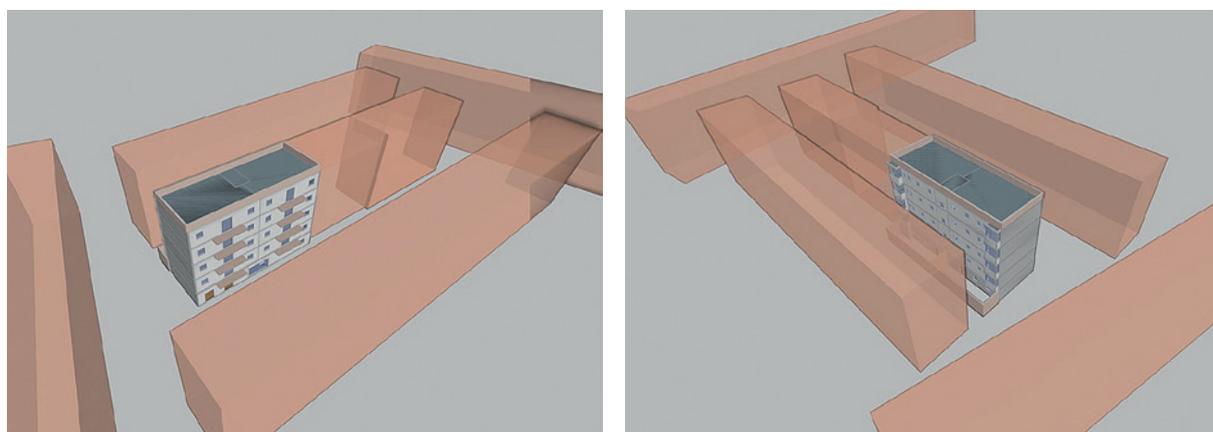


Figura 8.5. Modelo computacional desarrollado para la evaluación del rendimiento energético. Julia Díaz-Borrego

Configuración de la simulación

El Código Técnico de la Edificación (CTE) (Ministerio de Fomento, 2006) establece diferentes zonas climáticas en función de la severidad climática en invierno (SCI) y en verano (SCV). La zona climática correspondiente a la ciudad de Sevilla es la B4, que hace referencia a un clima suave en invierno y muy cálido en verano (Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana: *Documento Básico HE-Ahorro de Energía*, 2022).

En este trabajo se ha considerado esta zona climática para los análisis, así como la plantilla de datos meteorológicos denominada clima español para cálculos energéticos (de la Flor *et al.*, 2008). Las condiciones de simulación establecidas en la tabla 8.3 se han definido de acuerdo con la normativa energética española (Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana: *Documento Básico HE-Ahorro de Energía*, 2022). Las condiciones de funcionamiento se han aplicado de forma uniforme a las viviendas, modelando cada una de ellas como un único recinto (considerando únicamente sus parámetros de delimitación). Las áreas de distribución se han considerado como espacios no acondicionados, asumiendo una transferencia de calor dentro de sus divisiones interiores. Los datos de entrada relativos a la ventilación se han definido de acuerdo con el Instituto para la diversificación y ahorro de la energía (Instituto para la diversificación y ahorro de la energía [IDAE], 2009), asumiendo 1,25 ac/h durante todo el año y 4 ac/h de 00:00 a 08:00 hora local en verano. Los puentes térmicos se han introducido de acuerdo con la normativa del código de edificación español (Atlas de Puentes Térmicos DA DB-HE/3, 2006).

Tabla 8.3. Condiciones de la simulación energética

	1-7 h	8 h	9-15 h	16-18 h	19 h	20-23 h	24 h
Refrigeración							
Enero a mayo (°C)	—	—	—	—	—	—	—
Junio a septiembre (°C)	27	—	—	25	25	25	27
Octubre a diciembre (°C)	—	—	—	—	—	—	—
Calefacción							
Enero a mayo (°C)	17	20	20	20	20	20	17
Junio a septiembre (°C)	—	—	—	—	—	—	—
Octubre a diciembre (°C)	17	20	20	20	20	20	17
Cargas sensibles de ocupación							
Fin de semana (W/m ²)	2.15	0.54	0.54	1.08	1.08	1.08	2.15
Entre semana (W/m ²)	2.15	2.15	2.15	2.15	2.15	2.15	2.15
Cargas latentes de ocupación							
Fin de semana (W/m ²)	1.36	0.34	0.34	0.68	0.68	0.68	1.36
Entre semana (W/m ²)	1.36	1.36	1.36	1.36	1.36	1.36	1.36
Cargas sensibles debidas a los equipamientos luminotécnicos							
Todos los días (W/m ²)	0.44	1.32	1.32	1.32	2.20	4.40	2.20

	1-7 h	8 h	9-15 h	16-18 h	19 h	20-23 h	24 h
Cargas sensibles debidas a los equipamientos eléctricos							
Todos los días (W/m ²)	0.44	1.32	1.32	1.32	2.20	4.40	2.20
Ventilación							
Enero a mayo (ac/h)	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25
Junio a septiembre (ac/h)	4.00	4.00	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25
Octubre a diciembre (ac/h)	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25
Suministro de agua caliente a 60°C							
Todos los días (l/m ²)	0.00	0.26	0.065	0.065	0.13	0.26	0.00

8.2.4. Evaluación energética del estado actual de las viviendas de El Plantinar

Los resultados de la evaluación energética del estado actual de las viviendas han concluido que en las cuatro orientaciones que toman los diferentes bloques en la barriada, la demanda de calefacción es mucho mayor que la de refrigeración, como se muestra en la figura 8.6. Estos resultados son contrarios a lo que cabría esperar inicialmente para una zona climática con veranos cálidos. Sin embargo, la proporción de cañón urbano favorece el sombreado mutuo de los edificios, evitando en gran medida la radiación solar directa en las fachadas de los bloques. Resultados similares se han obtenido en análisis de viviendas sociales en esta ciudad por Santamaría *et al.* (2016) y Sendra *et al.* (2013).

Como se muestra en la tabla 8.4, no se encuentran diferencias significativas en los valores de demanda energética considerando las orientaciones de los bloques (NE, SW, NW, SE). Del mismo modo, al realizar un análisis detallado de las viviendas, no se encuentran diferencias significativas entre las viviendas de una misma planta (ver figura 8.7). Esto se debe principalmente a las

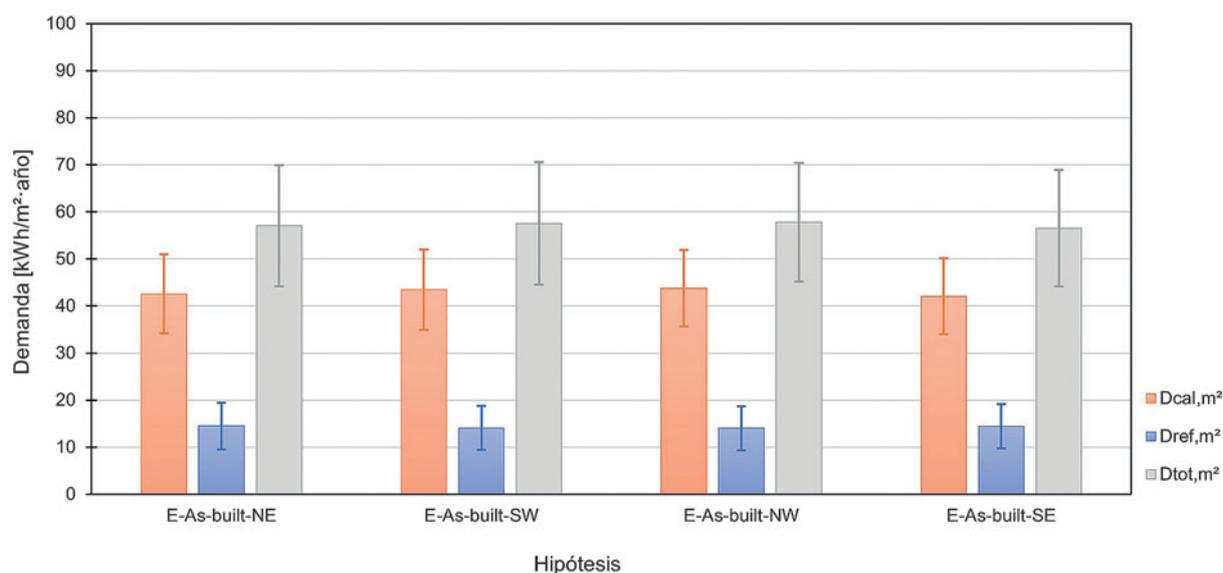


Figura 8.6. Valores promedios anuales de la demanda térmica por m² según la orientación. Julia Díaz-Borrego

Tabla 8.4. Valores de la demanda térmica anual obtenidos para la configuración actual de los bloques de viviendas

	PROMEDIO			MÁXIMO			MÍNIMO		
	Dcal, m ² [kWh/ m ² ·año]	Dref, m ² [kWh/ m ² ·año]	Dtot, m ² [kWh/ m ² ·año]	Dcal, m ² [kWh/ m ² ·año]	Dref, m ² [kWh/ m ² ·año]	Dtot, m ² [kWh/ m ² ·año]	Dcal, m ² [kWh/ m ² ·año]	Dref, m ² [kWh/ m ² ·año]	Dtot, m ² [kWh/ m ² ·año]
E-Asbuilt-NE	42.55	14.49	57.04	58.35	22.50	79.44	31.85	6.55	39.72
E-Asbuilt-SW	43.48	14.08	57.57	59.27	21.51	79.68	32.69	6.54	39.76
E-Asbuilt-NW	43.77	14.02	57.79	58.40	21.33	78.66	32.72	6.51	39.93
E-Asbuilt-SE	42.06	14.44	56.50	57.57	21.92	78.08	31.86	6.66	39.79

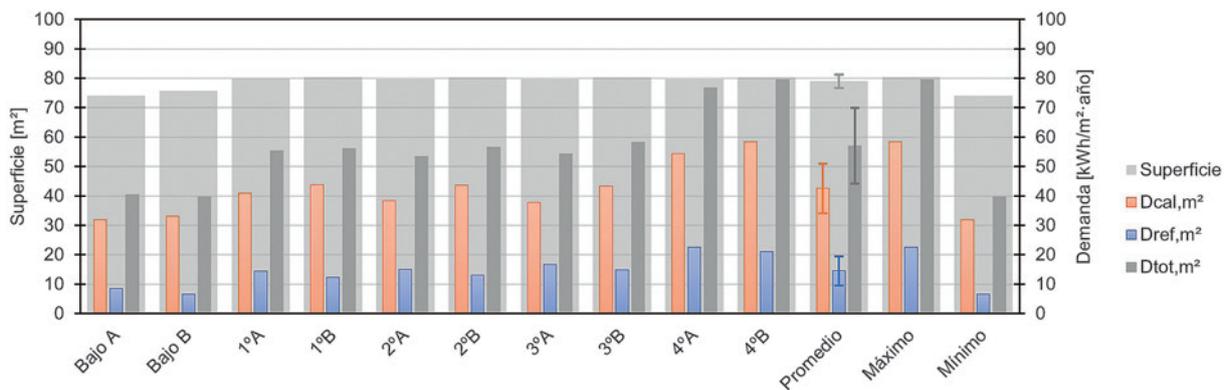


Figura 8.7. Demanda térmica anual por vivienda. Julia Díaz-Borrego

orientaciones que toman los bloques y a la tipología de los mismos: dos viviendas por planta y doble fachada. Sin embargo, se observan variaciones entre plantas, lo que se traduce en una mayor demanda requerida en las plantas superiores.

8.3. REFERENCIAS

- Campano Laborda, M. Á. (2015): *Confort térmico y eficiencia energética en espacios con alta carga interna climatizados: Aplicación a espacios docentes no universitarios en Andalucía*.
- De la Flor, F. J. S., Domínguez, S. Á., Félix, J. L. M. y Falcón, R. G. (2008): «Climatic zoning and its application to Spanish building energy performance regulations», *Energy and Buildings*, 40(10), 1984-1990. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2008.05.006>
- Domínguez, S., Sendra, J. J., León, A. L. y Esquivias, P. M. (2012): «Towards Energy Demand Reduction in Social Housing Buildings: Envelope System Optimization Strategies» *Energies*, 5(7), 2263-2287. <https://doi.org/10.3390/EN5072263>
- European Parliament (2019): *The European Green Deal*. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?qid=1576150542719&uri=COM%3A2019%3A640%3AFIN>

- Fernández-Agüera, J., Domínguez-Amarillo, S., Sendra, J. J. y Suarez, R. (2019): «Predictive models for airtightness in social housing in a Mediterranean region», *Sustainable Cities and Society*, 51, 101695. <https://doi.org/10.1016/J.SCS.2019.101695>
- Feustel, H. E. (1990): «Measurements of air permability in multizone buildings», *Energy & Buildings*, 14 (2), 103116. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/037877889090030M>
- Ibáñez Iralde, N. S., Pascual, J. y Salom, J. (2021): «Energy retrofit of residential building clusters. A literature review of crossover recommended measures, policies instruments and allocated funds in Spain», *Energy and Buildings*, 252, 111409. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111409>
- Instituto para la diversificación y ahorro de la energía (IDAE) (2009): *Condiciones de aceptación de procedimientos alternativos a LiDER y CALENER*. https://www.idae.es/sites/default/files/documentos/publicaciones_idae/documentos_calener_08_condiciones_proc_altern_a2009_a_ba596e72.pdf
- Instituto para la diversificación y ahorro de la energía (IDAE) (2011): *Proyecto SECH-SPAHOUSEC. Análisis del consumo energético del sector residencial en España. Informe Final*. <https://docplayer.es/24336-Analisis-del-consumo-energetico-del-sector-residencial-en-espana.html>
- León, Á. L., Domínguez, S., Campano, M. A. y Ramírez-Balas, C. (2012): «Reducing the Energy Demand of Multi-Dwelling Units in a Mediterranean Climate Using Solar Protection Elements», *Energies* 2012, 5(9), 3398-3424. <https://doi.org/10.3390/EN5093398>
- Mangan, S. D., Koclar Oral, G., Erdemir Kocagil, I. y Sozen, I. (2021): «The impact of urban form on building energy and cost efficiency in temperate-humid zones», *Journal of Building Engineering*, 33, 101626. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101626>
- Menna, C., del Vecchio, C., di Ludovico, M., Mauro, G. M., Ascione, F. y Prota, A. (2021): «Conceptual design of integrated seismic and energy retrofit interventions», *Journal of Building Engineering*, 38, 102190. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102190>
- Ministerio de Fomento (2006): *Atlas de puentes térmicos DA DB-HE/3*. España. https://www.codigotecnico.org/pdf/Documentos/HE/DA-DB-HE-3_Puentes_termicos.pdf
- Ministerio de Fomento (2006): *Código Técnico de la Edificación (CTE)*. España. <https://www.codigotecnico.org/>
- Ministerio de Transportes Movilidad y Agenda Urbana (2022): *Documento Básico Ahorro de Energía. Código Técnico de la Edificación*. España. <https://www.codigotecnico.org/pdf/Documentos/HE/DBHE.pdf>
- Ministerio de Transportes Movilidad y Agenda Urbana (2022): *Documento Básico Salubridad. Código Técnico de la Edificación*. España. <https://www.codigotecnico.org/pdf/Documentos/HS/DccHS.pdf>
- Ratti, C., Baker, N. y Steemers, K. (2005): «Energy consumption and urban texture», *Energy and Buildings*, 37(7), 762-776. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2004.10.010>
- Rodrigues, E., Amaral, A. R., Gaspar, A. R. y Gomes, Á. (2015): «An Approach to Urban Quarter Design Using Building Generative Design and Thermal Performance Optimization», *Energy Procedia*, 78, 2899-2904. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.662>
- Santamaría, J., Girón, S. y Campano, M. A. (2016): «Economic assessments of passive thermal rehabilitations of dwellings in Mediterranean climate», *Energy and Buildings*, 128, 772-784. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.07.035>
- Sendra, J. J., Domínguez, S., León, A. L., Navarro, J., Muñoz, S., León, J., Bustamante, P., García-López, J., Barrera, M. y Gentil, M. (2011): *Proyecto eficacia: optimización energética en la vivienda colectiva*. Sevilla: Editorial Universidad Sevilla.
- Sendra, J. J., Domínguez-Amarillo, S., Bustamante, P. y León, A. L. (2013): «Energy intervention in the residential sector in the south of Spain: Current challenges», *Informes de La Construcción*, 65(532), 457-464. <https://doi.org/10.3989/ic.13.074>
- Sherman, M. H. (1994): «The Use of Blower-Door Data», *Energy & Environment Division*. <https://escholarship.org/uc/item/61k345v7>
- Yang, X., Zhao, L., Bruse, M. y Meng, Q. (2012): «An integrated simulation method for building energy performance assessment in urban environments», *Energy and Buildings*, 54, 243-251. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.07.042>

9

Análisis de sensibilidad de soluciones integradas para la rehabilitación energética y sísmica de edificios existentes

María-Victoria Requena-García-Cruz*, Julia Díaz-Borrego**, Emilio Romero-Sánchez* y Antonio Morales-Esteban*

* *Departamento de Estructuras de Edificación e Ingeniería del Terreno
Universidad de Sevilla*

** *Departamento de Construcciones Arquitectónicas I
Universidad de Sevilla*

RESUMEN

Los edificios de la barriada de El Plantinar son altamente vulnerables al sismo: fueron construidos antes de la aplicación de normativas sísmicas y estructurales restrictivas; presentan materiales de construcción de calidad constructiva pobres; y los materiales constructivos y estructurales han envejecido. Además, presentan un comportamiento energético por debajo de los valores establecidos en la normativa de aplicación actual. Por ello, para cumplir con los estándares mínimos de eficiencia energética y seguridad estructural, necesitan ser rehabilitados.

En este trabajo se pretende realizar un análisis de sensibilidad para determinar los efectos y la influencia en el comportamiento sísmico y energético de diferentes soluciones de refuerzo. El objetivo es analizar soluciones integradas de mejora sísmica y energética para los edificios de esta barriada teniendo en cuenta el entorno urbano, los estándares mínimos establecidos en las normativas de aplicación así como la compatibilidad física y armonización de estas. La novedad que aquí se propone consiste en el diseño de soluciones únicas, compatibles, no invasivas y complementarias aplicadas a las fachadas de edificios existentes.

En este caso, se estudian estrategias de refuerzo tanto sísmico como energético (integradas) basadas en la mejora del comportamiento de los muros y de los elementos de fachada. Se ha obtenido que las soluciones con mayores índices de mejora son las que se aplican sobre los muros: la implementación de aislamiento térmico y mallas de acero estructural. Sin embargo, la mejora de los huecos tanto energética como estructural han obtenido niveles de mejora considerables siempre y cuando la cantidad de material de refuerzo sea importante.

9.1. DESCRIPCIÓN DE LA PROBLEMÁTICA DEL CASO DE ESTUDIO

Los estudios sobre el análisis combinado del comportamiento sísmico y de la eficiencia energética son muy limitados. De hecho, existe una falta de estrategias claras para la selección y el análisis de intervenciones integradas que maximicen los beneficios obtenidos con costes mínimos. Como se sugiere en varios trabajos, se necesita investigar sobre las posibles combinaciones de sistemas de rehabilitación sísmica y energética para obtener soluciones de mejora integradas (D'Angola *et al.*, 2019). Esto permite que para un mínimo incremento del coste se puedan obtener mejoras tanto energéticas como sísmicas. Además de los beneficios y sinergias que suponen la rehabilitación combinada, es importante indicar que la rehabilitación sostenible de los edificios existentes es un requisito previo para lograr los objetivos climáticos, energéticos y de seguridad estructural establecidos por las normativas europeas, nacionales y regionales. Por tanto, es necesario el desarrollo de herramientas prácticas que respalden el proceso de evaluación y toma de decisiones cuando se planifican intervenciones de reacondicionamiento y rehabilitación de edificios (Menna *et al.*, 2022).

Los edificios de la barriada de El Plantinar, como se indica en anteriores capítulos de este documento, son altamente vulnerables al sismo: fueron construidos antes de la aplicación de normativas sísmicas y estructurales restrictivas; presentan materiales de construcción de calidades constructivas pobres; y, los materiales constructivos y estructurales han envejecido. Además, presentan un comportamiento energético por debajo de los valores establecidos en la normativa de aplicación actual. Por ello, para cumplir con los estándares mínimos de eficiencia energética y seguridad estructural necesitan ser rehabilitados.

La rehabilitación sísmica de edificios de muros de ladrillo se basa fundamentalmente en cuatro estrategias: la mejora de las conexiones horizontales; la mejora de la rigidez de los forjados; la mejora del comportamiento fuera del plano; o la mejora del comportamiento en el plano (Segovia-Verjel *et al.*, 2019). En el caso de estos edificios, el fallo fuera del plano no ocurrirá puesto que presentan buenas conexiones horizontales. Sin embargo, pueden fallar en el plano, dado que las fachadas presentan una gran cantidad de huecos, con proporciones de paneles estrechas donde se concentrarán una gran cantidad de tensiones, produciéndose el daño localizado. Además, los edificios se caracterizan por la ausencia de aislamiento térmico en la fachada y por la aparición de numerosos puentes térmicos en las juntas de la fachada. Las carpinterías son correderas, de aluminio, sin rotura de puente térmico y con acristalamiento simple con persiana exterior enrollable. Esto hace que el edificio no cumpla con los estándares establecidos en la normativa sobre el comportamiento energético.

En este trabajo se pretende realizar un análisis de sensibilidad para determinar los efectos e influencia en el comportamiento sísmico y energético de diferentes soluciones de refuerzo. El objetivo es analizar soluciones integradas de mejora sísmica y energética teniendo en cuenta el entorno urbano, los estándares mínimos establecidos en las normativas de aplicación así como la compatibilidad física y armonización de estas. Las soluciones se han diseñado para el caso de estudio de la barriada de antigua construcción de El Plantinar. La novedad que aquí se propone consiste en el diseño de soluciones únicas, compatibles, no invasivas y complementarias aplicadas a las fachadas de edificios existentes.

9.2. DESCRIPCIÓN DE LAS SOLUCIONES EMPLEADAS

De los tres tipos de bloques que se han identificado en la barriada de El Plantinar, en este trabajo, se ha analizado la edificación tipo 1. Este es el bloque más grande y se encuentra aislado. Esto permite evitar en los análisis del comportamiento sísmico los posibles efectos por el golpeo entre edificios adyacentes (Angiolilli *et al.*, 2021). El caso de estudio se analiza en las cuatro orientaciones posibles, cubriendo los diferentes casos de localización urbana que se pueden encontrar en la barriada.

Las estrategias de refuerzo se han seleccionado de acuerdo a los resultados obtenidos en el estado *as-built* del edificio. En este caso, el edificio se comporta estructuralmente como una caja debido a las buenas conexiones horizontales. Por tanto, el edificio fallará fundamentalmente en el plano, es decir, por la capacidad resistente de los muros de ladrillo. Además, a partir de la evaluación *as-built* se ha observado que en las fachadas del edificio se producen las transferencias de calor más altas. Dada esta situación, en este caso, se aplican estrategias de refuerzo tanto sísmico como energético (integradas) basadas en la mejora del comportamiento de los muros y los elementos de fachada. Cabe mencionar la importancia de la cubierta en el comportamiento energético del edificio. Sin embargo, dado que el objetivo de este trabajo es proponer soluciones integrales de rehabilitación sísmica y energética, no se tendrá en cuenta en los análisis de sensibilidad.

Por lo tanto, de acuerdo con el comportamiento *as-built* del edificio caso de estudio, se proponen diferentes paquetes de refuerzo (PR). Estos están enfocados en mejorar el comportamiento de los dos aspectos principales de la fachada de los edificios de muros de carga de ladrillo. Ambos factores afectan tanto al comportamiento sísmico como al energético. Además, estas son dos de las estrategias de mejora energética más empleadas en rehabilitación de edificios residenciales existentes (Broderick *et al.*, 2017; Domínguez *et al.*, 2012a): huecos (PR₁) y muros (PR₂). En los capítulos siguientes se propone un paquete de refuerzo denominado como PR₃, que se ha determinado al combinar las soluciones de cada PR. Los diseños conceptuales de los PR seleccionados se muestran en figura 9.1.

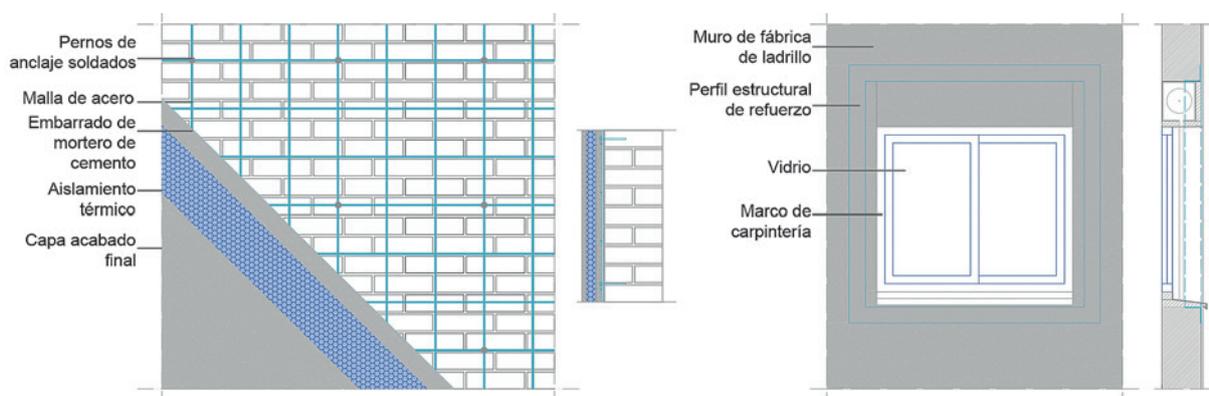


Figura 9.1. Detalles conceptuales de las soluciones de refuerzo integrado. Refuerzo de muros con mallas de acero e incorporación de aislamiento térmico. Implementación de perfiles estructurales en marcos de huecos y cambio de marcos y vidrios de ventanas

Tabla 9.1. Modelos definidos para el análisis de sensibilidad

Comportamiento sísmico				Comportamiento energético			
PR ₁		PR ₂		PR ₁		PR ₂	
Extendido	Ab.	Extendido	Ab.	Extendido	Ab.	Extendido	Ab.
PR1-L-60-1	S-W1	PR2-15-6-1	S-F1	PR1-AL-STA-NE	E-W1-NE	PR2-EPS-5-NE	E-F1-NE
PR1-L-60-2	S-W2	PR2-15-8-1	S-F2	PR1-AL-STA-SW	E-W1-SW	PR2-EPS-5-SW	E-F1-SW
PR1-L-90-1	S-W3	PR2-20-6-1	S-F3	PR1-AL-STA-NW	E-W1-NW	PR2-EPS-5-NW	E-F1-NW
PR1-L-90-2	S-W4	PR2-20-8-1	S-F4	PR1-AL-STA-SE	E-W1-SE	PR2-EPS-5-SE	E-F1-SE
PR1-L-120-1	S-W5	PR2-30-6-1	S-F5	PR1-AL-LEM-NE	E-W2-NE	PR2-EPS-10-NE	E-F2-NE
PR1-L-120-2	S-W6	PR2-30-8-1	S-F6	PR1-AL-LEM-SW	E-W2-SW	PR2-EPS-10-SW	E-F2-SW
PR1-O-60-1	S-W7	PR2-15-6-2	S-F7	PR1-AL-LEM-NW	E-W2-NW	PR2-EPS-10-NW	E-F2-NW
PR1-O-60-2	S-W8	PR2-15-8-2	S-F8	PR1-AL-LEM-SE	E-W2-SE	PR2-EPS-10-SE	E-F2-SE
PR1-O-90-1	S-W9	PR2-20-6-2	S-F9	PR1-WOOD-STA-NE	E-W3-NE	PR2-EPS-5-10-NE	E-F3-NE
PR1-O-90-2	S-W10	PR2-20-8-2	S-F10	PR1-WOOD-STA-SW	E-W3-SW	PR2-EPS-5-10-SW	E-F3-SW
PR1-O-120-1	S-W11	PR2-30-6-2	S-F11	PR1-WOOD-STA-NW	E-W3-NW	PR2-EPS-5-10-NW	E-F3-NW
PR1-O-120-2	S-W12	PR2-30-8-2	S-F12	PR1-WOOD-STA-SE	E-W3-SE	PR2-EPS-5-10-SE	E-F3-SE
				PR1-WOOD-LEM-NE	E-W4-NE	PR2-RW-5-NE	E-F4-NE
				PR1-WOOD-LEM-SW	E-W4-SW	PR2-RW-5-SW	E-F4-SW
				PR1-WOOD-LEM-NW	E-W4-NW	PR2-RW-5-NW	E-F4-NW
				PR1-WOOD-LEM-SE	E-W4-SE	PR2-RW-5-SE	E-F4-SE
				PR1-PVC-STA-NE	E-W5-NE	PR2-RW-10-NE	E-F5-NE
				PR1-PVC-STA-SW	E-W5-SW	PR2-RW-10-SW	E-F5-SW
				PR1-PVC-STA-NW	E-W5-NW	PR2-RW-10-NW	E-F5-NW
				PR1-PVC-STA-SE	E-W5-SE	PR2-RW-10-SE	E-F5-SE
				PR1-PVC-LEM-NE	E-W6-NE	PR2-RW-5-10-NE	E-F6-NE
				PR1-PVC-LEM-SW	E-W6-SW	PR2-RW-5-10-SW	E-F6-SW
				PR1-PVC-LEM-NW	E-W6-NW	PR2-RW-5-10-NW	E-F6-NW
				PR1-PVC-LEM-SE	E-W6-SE	PR2-RW-5-10-SE	E-F6-SE

9.3. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

En base a cada PR, se han propuesto diferentes soluciones de refuerzo. En el caso del comportamiento sísmico, PR₁ ha consistido en la implementación de perfiles estructurales en los marcos de los huecos del muro. Para la mejora energética, PR₁ se ha basado en la sustitución/mejora de las ventanas (tanto vidrios como marcos). En el caso de PR₂, la mejora sísmica ha consistido en la implementación de mallas de acero sobre los muros, conectadas a través de pernos de anclaje soldados. Para la mejora sísmica, se ha añadido aislamiento térmico en la cara exterior de los muros de fábrica.

El objetivo principal de este trabajo es analizar la influencia de cada técnica de rehabilitación. Para ello, se ha realizado un análisis de sensibilidad y se han definido diferentes modelos. Estos modelos se han determinado variando diferentes parámetros definidos según el comportamiento sísmico o energético. Los parámetros y modelos se describen en los siguientes apartados. Los diferentes modelos que se han analizado se enumeran en la tabla 9.1. En total, se han evaluado 24 y 48 configuraciones para la mejora del comportamiento sísmico y energético, respectivamente. La nomenclatura de cada solución abreviada (Ab) se define en cada apartado correspondiente.

9.3.1. Modelos para el análisis de la mejora sísmica

En el caso de la mejora del comportamiento sísmico (S), el análisis de sensibilidad se ha basado en variar tres parámetros: i) la cantidad de material de refuerzo; ii) el tipo de material de refuerzo; y iii) el tipo de elementos de refuerzo. Para i), se ha variado la separación y la dimensión de los elementos. Para ii), se ha variado el tipo de acero estructural. Para iii), se ha cambiado el tipo de perfiles que se añaden en los huecos de los muros.

En la tabla 9.2 se enumeran y describen las diferentes configuraciones modeladas. La nomenclatura de cada modelo se define según las abreviaturas en negrita. En este caso, se ha optado por emplear el material de acero, dado que es el más empleado en rehabilitación sísmica de edificios de muros de carga. Normalmente, este se emplea como perfiles o mallas reforzadas con capas de mortero de cemento (Segovia-Verjel *et al.*, 2019).

Tabla 9.2. Parámetros variados en el análisis de sensibilidad del comportamiento sísmico

	S-PR ₁	S-PR ₂
i) Cantidad de material de refuerzo	60.5.8 / 90.10.11 / 120.10.13 – Perfil en L 60.2 / 90.5 / 120.4 – Perfil en O	Separación: 15 / 20 / 30 mm Dimensión: ϕ6 / ϕ8 mm
ii) Tipo de material de refuerzo	$f_y = 235$ (1) / 275 (2) MPa	$f_y = 235$ (1) / 275 (2) MPa
iii) Tipo de elementos	Perfil en L / Perfil en O	–

El modelado numérico de cada técnica de refuerzo se ha desarrollado en OpenSees (McKenna *et al.*, 2000). PR₁ se ha modelado agregando elementos tipo barra conectados con los muros mediante elementos rígidos. Los marcos se han modelado como elementos tipo *force-beam*. PR₂ se ha modelado modificando las leyes constitutivas de los paneles y según la cantidad de material de refuerzo añadido. Se han seguido el procedimiento y las fórmulas presentados en (Petrovčič y Kilar, 2020). Este proceso ha sido diseñado para modelar elementos de refuerzo estructural en macroelementos tipo de muros de carga. Las propiedades del acero estructural de los elementos de rehabilitación son: módulo de elasticidad, 210 GPa y peso específico, 76,98 kN/m³. El modelado numérico de la estructura se realiza según lo indicado en los capítulos anteriores.

9.3.2. Modelos para el análisis de la mejora energética

Para la mejora del comportamiento energético (E), se han definido diferentes hipótesis variando algunos parámetros en el análisis de sensibilidad. Los modelos analizados se establecen en la tabla 9.3. E-PR₁ se ha basado en la mejora de la transmitancia térmica y la mejora de la estanqueidad en huecos de ventanas.

Se han definido diferentes modelos variando el material del marco y la composición del vidrio. E-PR₂ se ha centrado en mejorar la transmitancia térmica de la fachada opaca. Para ello se han definido diferentes modelos variando el material del sistema compuesto de aislamiento térmico exterior (SATE), así como el espesor del aislamiento. Además, en base a los resultados obtenidos en estudios previos (Domínguez *et al.*, 2012b), se introduce una tercera hipótesis en la que el espesor del aislamiento varía según la orientación de cada fachada (fachadas sur, un espesor y fachadas norte, otro). Esto se propone para analizar la mejora del posible desequilibrio de requerimientos de la demanda debido al tratamiento homogéneo de las diferentes fachadas.

En todos los escenarios se han modificado los puentes térmicos en el modelo de simulación de acuerdo con la normativa vigente (Ministerio de Fomento, 2006). En cuanto a la predicción de la estanqueidad, al introducir la mejora de fachadas y/o huecos, se han tenido en cuenta diferentes supuestos. Según estudios previos, se concluye que la implantación de un sistema SATE sin tocar huecos no introduce modificaciones importantes en las infiltraciones en la vivienda (Fernández-Agüera, Domínguez-Amarillo, Sendra y Suárez, 2019; Fernández-Agüera, Domínguez-Amarillo, Sendra, Suárez, *et al.*, 2019; Fernández-Agüera *et al.*, 2016).

Por el contrario, la renovación de sistemas de ventanas supone una reducción del 30 al 40 % del valor n_{50} (Salehi *et al.*, 2017). Este margen de mejora concuerda con los datos obtenidos en (Feijó-Muñoz, Pardal *et al.*, 2019; Fernández-Agüera, Domínguez-Amarillo, Sendra y Suárez, 2019; Salehi *et al.*, 2017). La diferencia en los materiales del marco solo implica un cambio sustancial en el PVC, mientras que el aluminio y la madera se comportan de manera similar (Feijó-Muñoz, González-Lezcano, *et al.*, 2019). Por tanto, en base a los datos medidos en estudios previos, el valor de infiltración se mantiene constante para los escenarios E-PR₂ y se modifica para el E-PR₁. Se establece un valor de n_{50} de 6,5 para la hipótesis con marcos de aluminio y madera y de 5,0 para las configuraciones con marcos de PVC.

Tabla 9.3. Modelos analizados en el análisis de sensibilidad del comportamiento energético

		Material [Transmitancia U (W/m ² K)]	Propiedades [Transmitancia U (W/m ² K)]	[Transmitancia U (W/m ² K)]	Factor solar
As-built	W0	Aluminio (sin rotura de Puente térmico) [5.70]	4 mm vidrio simple [5.70]	–	0.83
E-PR ₁	W1	Aluminio con rotura de puente térmico [2.80]	4/6/4 vidrio normal [3.30]	–	0.75
	W2		4/6/4 vidrio baja emisividad [2.50]	–	0.48
	W3	Madera [1.43]	4/6/4 vidrio normal [3.30]	–	0.75
	W4		4/6/4 vidrio baja emisividad [2.50]	–	0.48
	W5	PVC [2.30]	4/6/4 vidrio normal [3.30]	–	0.75
	W6		4/6/4 vidrio baja emisividad [2.50]	–	0.48
As-built	F0	–	–	1.74	–
E-PR ₂	F1	Poliestireno expandido (EPS) [0.037]	5 cm	0.51	–
	F2		10 cm	0.31	–
	F3		Combinado	0.51 / 0.31	–
	F4	Lana de roca [0.037]	5 cm	0.51	–
	F5		10 cm	0.31	–
	F6		Combinado	0.51 / 0.31	–

9.4. RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

La evaluación del comportamiento de los modelos reforzados se ha realizado de la misma manera que para la estructura en estado *as-built*. Este proceso se muestra en capítulos anteriores. En este apartado se ha realizado un modelo para cada una de las soluciones establecidas en la tabla 9.1 (página 168) para obtener su comportamiento sísmico y energético.

En el caso del comportamiento sísmico, tras realizar los análisis modales se han realizado análisis estáticos no lineales. Se ha empleado el método N2 para determinar el comportamiento sísmico de cada solución. En la figura 9.2, se han representado los resultados obtenidos para las distintas configuraciones analizadas que corresponden a la técnica S-PR₁. A partir de esta figura, se puede observar que al agregar marcos estructurales sobre los huecos en fachada en la

dirección, en este caso la X, no afecta al comportamiento de los modelos en la otra dirección, la Y. Como puede verse, la rigidez inicial del sistema de muros de carga no se ve afectada significativamente por la adición de estos elementos de refuerzo. Las soluciones que implementan perfiles tipo O producen mayores niveles de mejora del comportamiento a aquellas que agregan perfiles tipo L. La implementación de un material de acero mejorado conduce a una cierta mejora del comportamiento. Esta puede alcanzar valores de hasta un 5-10 % de mejora en comparación con el otro material de acero. Se pueden observar diferencias considerables al añadir el perfil más pequeño de la serie (ya sea perfil O o L) hasta el más grande, alcanzando porcentajes de mejora de hasta el 20 %.

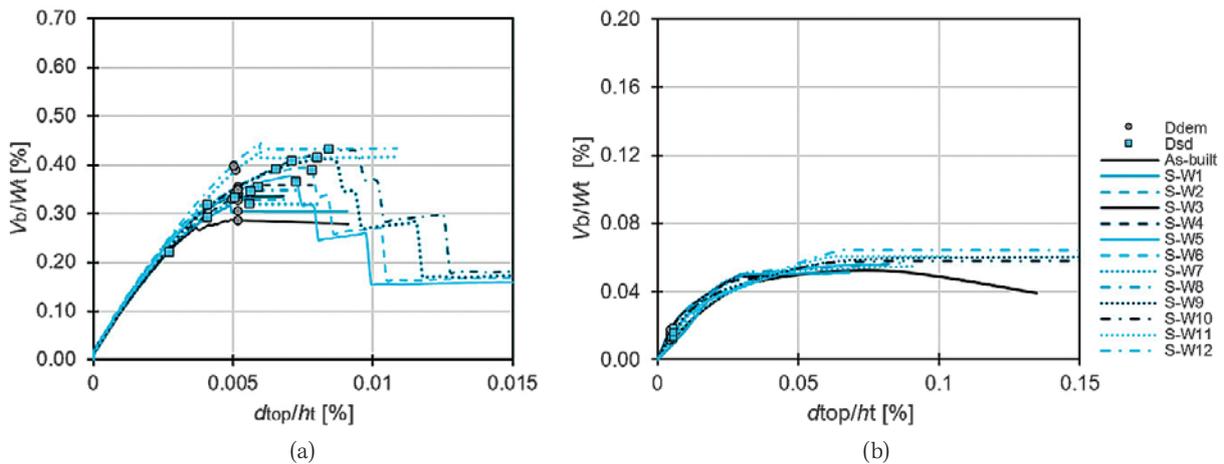


Figura 9.2. Curvas de capacidad para el sistema de un grado de libertad normalizadas, considerando las soluciones de S-PR₁ en la dirección X (a) e Y (b) del edificio

La implementación de mallas de acero sobre los muros de carga, S-PR₂, ha dado lugar a mayores índices de mejora en comparación con la adición de marcos estructurales en los huecos, tal y como se puede apreciar en la figura 9.3. Esto se debe principalmente al aumento considerable de la rigidez inicial del sistema de muros de fábrica, que se puede apreciar fácilmente en los gráficos. Las soluciones que añaden unas separaciones de mallas más pequeñas y una mejor

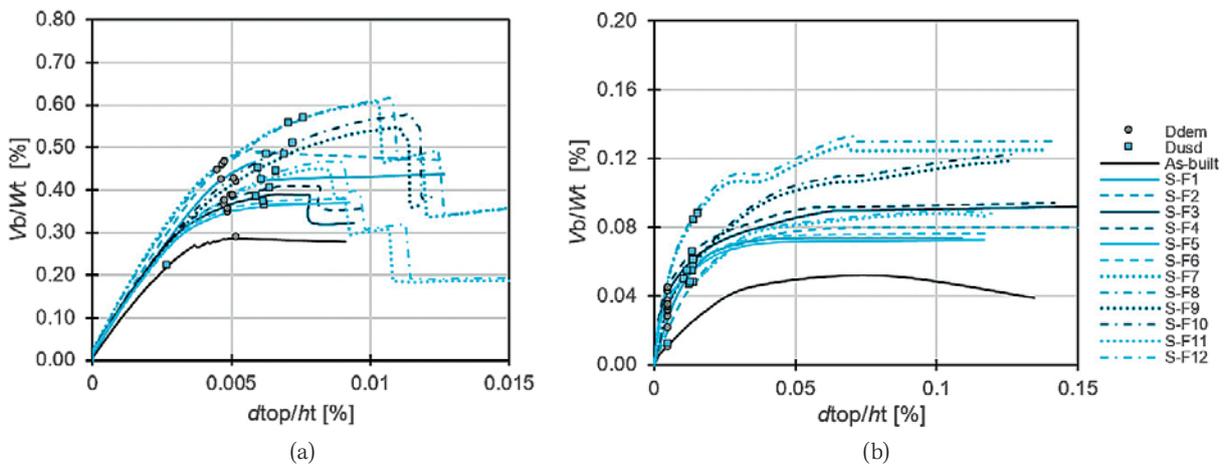


Figura 9.3. Curvas de capacidad para el sistema de un grado de libertad normalizadas, considerando las soluciones de S-PR₂ en la dirección X (a) e Y (b) del edificio

resistencia del acero son las que mejores comportamientos han tenido. El aumento del diámetro de las barras de la malla no ha producido una mejora considerable del comportamiento y casi se puede considerar como despreciable. En este caso, se ha mejorado el comportamiento de la dirección Y, ya que también se han reforzado los muros perimetrales que existen en el edificio dispuestos en esta dirección.

En el caso de la evaluación del comportamiento energético, se ha analizado la mejora de los modelos establecidos en la tabla 9.1 (página 168) frente al estado *As-built*. En la figura 9.4 se muestran los resultados de demanda térmica anual y según los valores medios obtenidos por orientación, para cada paquete de refuerzo E-PR₁ y E-PR₂. Además, la figura 9.5 muestra la desviación de la demanda térmica anual por m² en comparación con el estado *as-built*. Estos gráficos revelan que la renovación de las ventanas se traduce en una mejora energética anual moderada del edificio. Asimismo, el comportamiento energético de los modelos no sufre cambios significativos cuando se modifica el material de los marcos de las ventanas. Por último, la introducción de vidrios de baja emisividad no supone una reducción sustancial de la demanda energética anual, mientras que sí supondrá un aumento económico considerable, como se demuestra en los siguientes capítulos del documento.

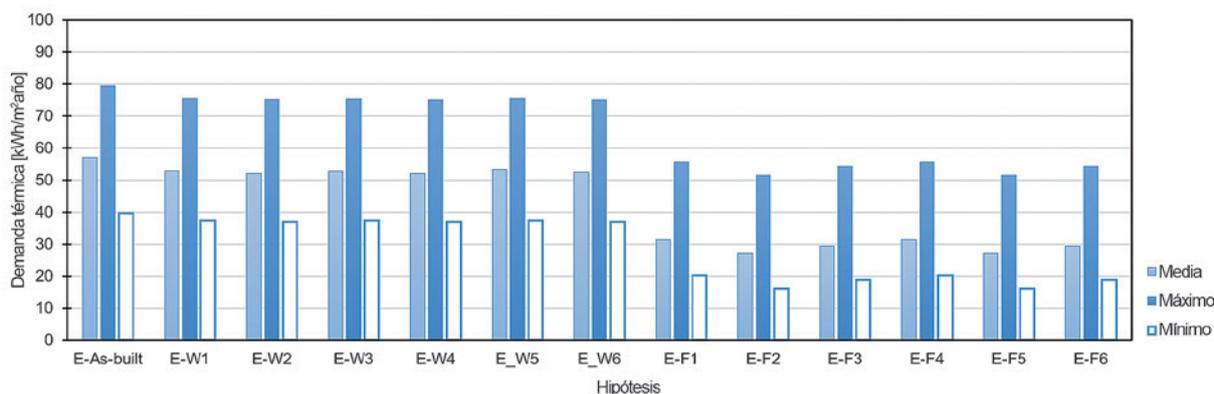


Figura 9.4. Demanda térmica anual por m² de las hipótesis (valores medios de los diferentes modelos variando las orientaciones y por hipótesis)

La implementación del aislamiento térmico en muros ha supuesto unos ratios de mejora superiores a los de la renovación de las ventanas (figura 9.4 y figura 9.5). Esto se debe principalmente a la considerable reducción de los puentes térmicos en comparación con el estado *as-built*. Así, la incorporación de aislamiento térmico en el exterior de la fachada, en estricto cumplimiento del Código Técnico de la Edificación (CTE) ($e=5$ cm), supone una mejora considerable en el rendimiento energético del edificio. De hecho, puede reducir la demanda anual de calefacción y refrigeración a casi la mitad. Como era de esperar, un aumento del espesor hasta 10 cm no conduce a una reducción proporcional de la demanda, a pesar de ser sustancialmente mayor. Finalmente, en línea con los resultados obtenidos del estado *as-built*, el tratamiento pormenorizado de las fachadas, según la orientación, no introduce un margen de mejora interesante. Esto se debe a la posición de las manzanas en la configuración urbana (orientación) y la tipología de las manzanas en sí (viviendas de doble fachada). Por lo tanto, no hay desequilibrio energético entre las diferentes orientaciones de las viviendas.

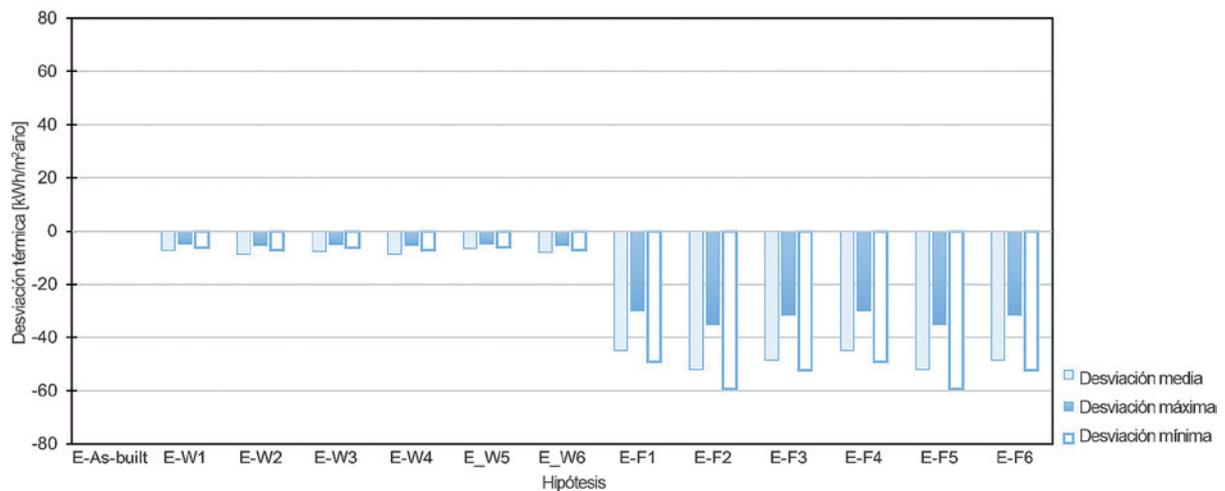


Figura 9.5. Desviación de la demanda por m² (media, máxima y mínima) respecto al estado *as-built*

9.5. CONCLUSIONES

En este trabajo se pretende realizar un análisis de sensibilidad para determinar los efectos e influencia en el comportamiento sísmico y energético de diferentes soluciones de refuerzo. El objetivo es analizar soluciones integradas de mejora sísmica y energética teniendo en cuenta el entorno urbano, los estándares mínimos establecidos en las normativas de aplicación así como la compatibilidad física y armonización de estas. Las soluciones han sido diseñadas para el caso de estudio de la barriada de antigua construcción de El Plantinar.

Los resultados de la evaluación del comportamiento sísmico han mostrado que los índices de beneficios más altos se han obtenido para S-PR₂, la adición de mallas de acero sobre muros de carga de fábrica de ladrillo. Al aumentar la resistencia del material de acero, se produce un aumento del rendimiento del 5 al 10 % en comparación con el material de acero normal. Los perfiles tipo O producen mejoras del rendimiento más significativas que la adición de perfiles en L. Esto se debe al aumento de la inercia de los perfiles. El aumento del diámetro de la armadura en mallas de acero sobre muros no ha producido ratios de mejora considerables.

Los resultados de la evaluación del comportamiento energético han demostrado que la aplicación de aislamiento exterior en los muros de fábrica es la técnica con mayor impacto en el comportamiento termoenergético de las viviendas. Incluso añadiendo un espesor mínimo de aislamiento, en estricto cumplimiento con el CTE, se puede conseguir una mejora sustancial.

En base al edificio objeto de estudio, se ha obtenido que la orientación, las tipologías edificatorias, las relaciones entre alto-ancho de las calles y la situación urbanística no afectan al comportamiento térmico de las viviendas del barrio. Sin embargo, estos factores afectan a las viviendas por planta dentro de una misma manzana. Por último, la renovación de ventanas sin mejorar el comportamiento de la fachada no implica una mejora significativa en el comportamiento térmico, energético y sísmico/estructural de los edificios.

9.6. REFERENCIAS

- Angiolilli, M., Lagomarsino, S., Cattari, S. y Degli Abbatì, S. (2021): «Seismic fragility assessment of existing masonry buildings in aggregate», *Engineering Structures*, 247, 113218. <https://doi.org/10.1016/J.ENG-STRUCT.2021.113218>
- Broderick, Á., Byrne, M., Armstrong, S., Sheahan, J. y Coggins, A. M. (2017): «A pre and post evaluation of indoor air quality, ventilation, and thermal comfort in retrofitted co-operative social housing», *Building and Environment*, 122, 126-133. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.05.020>
- D'Angola, A., Manfredi, V., Masi, A. y Mecca, M. (2019): «Energy and Seismic Rehabilitation of RC Buildings through an Integrated Approach: An Application Case Study», *Green Energy Advances*. <https://doi.org/10.5772/INTECHOPEN.82581>
- Domínguez, S., Sendra, J. J., León, A. L. y Esquivias, P. M. (2012a): «Towards Energy Demand Reduction in Social Housing Buildings: Envelope System Optimization Strategies», *Energies*, 5(7), 2263-2287. <https://doi.org/10.3390/en5072263>
- Domínguez, S., Sendra, J. J., León, A. L. y Esquivias, P. M. (2012b): «Towards Energy Demand Reduction in Social Housing Buildings: Envelope System Optimization Strategies», *Energies* 2012, 5(7), 2263-2287. <https://doi.org/10.3390/EN5072263>
- Feijó-Muñoz, J., González-Lezcano, R. A., Poza-Casado, I., Padilla-Marcos, M. Á. y Meiss, A. (2019): «Airtightness of residential buildings in the Continental area of Spain», *Building and Environment*, 148, 299-308. <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2018.11.010>
- Feijó-Muñoz, J., Pardal, C., Echarri, V., Fernández-Agüera, J., Assiego de Larriva, R., Montesdeoca Calderín, M., Poza-Casado, I., Padilla-Marcos, M. Á. y Meiss, A. (2019): «Energy impact of the air infiltration in residential buildings in the Mediterranean area of Spain and the Canary islands», *Energy and Buildings*, 188-189, 226-238. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2019.02.023>
- Fernández-Agüera, J., Domínguez-Amarillo, S., Sendra, J. J. y Suárez, R. (2016): «An approach to modelling envelope airtightness in multi-family social housing in Mediterranean Europe based on the situation in Spain», *Energy and Buildings*, 128, 236-253. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2016.06.074>
- Fernández-Agüera, J., Domínguez-Amarillo, S., Sendra, J. J. y Suárez, R. (2019): «Predictive models for airtightness in social housing in a Mediterranean region», *Sustainable Cities and Society*, 51, 101695. <https://doi.org/10.1016/J.SCS.2019.101695>
- Fernández-Agüera, J., Domínguez-Amarillo, S., Sendra, J. J., Suárez, R. y Oteiza, I. (2019): «Social housing airtightness in Southern Europe», *Energy and Buildings*, 183, 377-391. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2018.10.041>
- McKenna, F., Fenves, G. L. y Scott, M. H. (2000): *OpenSees: Open system for earthquake engineering simulation*. Pacific Earthquake Engineering Research Center. University of California. Estados Unidos.
- Menna, C., Felicioni, L., Negro, P., Lupísek, A., Romano, E., Prota, A. y Hájek, P. (2022): «Review of methods for the combined assessment of seismic resilience and energy efficiency towards sustainable retrofitting of existing European buildings», *Sustainable Cities and Society*, 77, 103556. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103556>
- Ministerio de Fomento (2006): *Atlas de puentes térmicos DA DB-HE/3*. España. https://www.codigotecnico.org/pdf/Documentos/HE/DA-DB-HE-3_Puentes_termicos.pdf
- Petrovčič, S. y Kilar, V. (2020): «Design Considerations for Retrofitting of Historic Masonry Structures with Externally Bonded FRP Systems», *International Journal of Architectural Heritage*, 1-20. <https://doi.org/10.1080/15583058.2020.1853278>
- Salehi, A., Torres, I. y Ramos, A. (2017): «Experimental analysis of building airtightness in traditional residential Portuguese buildings», *Energy and Buildings*, 151, 198-205. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2017.06.037>
- Segovia-Verjel, M. L., Requena-García-Cruz, M. V., De-Justo-Moscardó, E. y Morales-Esteban, A. (2019): «Optimal seismic retrofitting techniques for URM school buildings located in the southwestern Iberian peninsula», *PLoS ONE*, 14(10), 1-18. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0223491>

10

Evaluación de soluciones integradas de rehabilitación energética y sísmica a través de un índice beneficio-coste

Julia Díaz-Borrego*, María-Victoria Requena-García-Cruz**,
Jésica Fernández-Agüera* y Samuel Domínguez-Amarillo*

* *Departamento de Construcciones Arquitectónicas I
Universidad de Sevilla*

** *Departamento de Estructuras de Edificación e Ingeniería del Terreno
Universidad de Sevilla*

RESUMEN

Este trabajo trata sobre la evaluación de soluciones integradas de rehabilitación sísmica y energética a través de un índice de beneficio-coste. Estas soluciones han sido implementadas de manera combinada e integrada de manera que, en una única actuación, se puede obtener una mejora del comportamiento energético y sísmico de los edificios. Las soluciones han sido diseñadas para los edificios de la barriada de El Plantinar.

A partir de este índice, las soluciones se han evaluado comparativamente y se han clasificado. Para ello, se ha tenido en cuenta las siguientes consideraciones: el coste, el entorno urbano de los edificios de la barriada caso de estudio, el comportamiento sísmico y energético requeridos (es decir, utilizando parámetros de rendimiento adecuados u objetivos mínimos prescritos por la normativa), la compatibilidad física entre las técnicas, la interrupción del uso del edificio y el tiempo de construcción.

Los resultados han mostrado que las soluciones sísmicas propuestas suponen un coste despreciable y producen una notable mejora del comportamiento sísmico de los edificios. Con respecto a las soluciones energéticas, se ha encontrado que existen diferencias notables entre las soluciones. A la luz de los resultados, este trabajo concluye que la rehabilitación sísmico-energética multiobjetivo de edificios existentes puede dar lugar a sinergias, reduciendo el coste económico de las soluciones debido a la reducción del tiempo de instalación y de la necesidad de mano de obra, materiales y recursos. Esto puede permitir la mejora del comportamiento sísmico/estructural de los edificios en caso de un evento sísmico futuro de hasta un 240% en comparación con las obras de rehabilitación puramente energéticas, que pueden suponer una mejora de hasta el 300%.

10.1. INTRODUCCIÓN

Este trabajo trata sobre la evaluación de soluciones integradas de rehabilitación sísmica y energética implementadas en edificios existentes de estructura de muros de carga. Estas soluciones se implementan de manera combinada e integrada, de manera que, en una única actuación, se puede obtener una mejora del comportamiento energético y sísmico de los edificios. Estas soluciones han sido diseñadas en capítulos anteriores para los edificios de barriada de antigua construcción de El Plantinar, situada en Sevilla, de acuerdo al análisis del estado *as-built*. Se trata de soluciones únicas, compatibles, no invasivas y complementarias que se aplican sobre la fachada de estos edificios, según dos tipos de paquetes de refuerzo (PR): PR₁, centrado en la mejora del comportamiento de los huecos (reemplazando marcos de ventana y vidrios e incluyendo marcos estructurales); y, PR₂, basado en la mejora del comportamiento de los muros (añadiendo mallas de acero estructurales y aislamiento térmico en la cara exterior de la envolvente). Una vez analizadas pormenorizadamente, ambas PR se han combinado, dando lugar a PR₃.

El objetivo es evaluar las soluciones, ya seleccionadas en capítulos anteriores, tras un análisis de sensibilidad sobre sus efectos en el comportamiento energético (E) y sísmico (S) del edificio. Esta evaluación, en este caso, se ha realizado a partir de un índice beneficio-coste (Requena-García-Cruz *et al.*, 2019). De esta manera, las soluciones se han evaluado comparativamente y se han clasificado. Para ello, se han tenido en cuenta las siguientes consideraciones: el coste, el entorno urbano de los edificios de la barriada caso de estudio, el comportamiento sísmico y energético requeridos (es decir, utilizando parámetros de rendimiento adecuados u objetivos mínimos prescritos por la normativa), la compatibilidad física entre las técnicas, la interrupción del uso del edificio y el tiempo de construcción. La combinación de las intervenciones se aplica a un edificio caso de estudio de muros de carga de fábrica de ladrillo que pertenece a la barriada de El Plantinar. Esta barriada es representativa del tipo de construcción mediterránea que se realizó durante los años 60 y, en particular, del parque inmobiliario residencial andaluz.

La metodología que se ha seguido en este trabajo permite el conseguir beneficios desde varios puntos de vista: el diseño y análisis de soluciones rentables teniendo en cuenta los costes de construcción y la reducción de la energía incorporada (y las correspondientes emisiones de CO₂) y el daño sísmico; diseño con un mínimo impacto arquitectónico; y, la optimización de recursos (económicos y materias primas) durante su implementación. El método seguido en esta investigación se muestra en la figura 10.1.

10.2. MÉTODO PARA EL ANÁLISIS BENEFICIO-COSTE

El objetivo de este trabajo es obtener las configuraciones de refuerzo óptimas para ahorrar recursos económicos y materiales, al mismo tiempo que se produce una mejora considerable del rendimiento. Para realizar la evaluación combinada energética y sísmica, en primer lugar, se han determinado las soluciones óptimas, teniendo en cuenta por separado la mejora del rendimiento energético y sísmico. Para su selección se ha utilizado una relación beneficio-coste, calculada

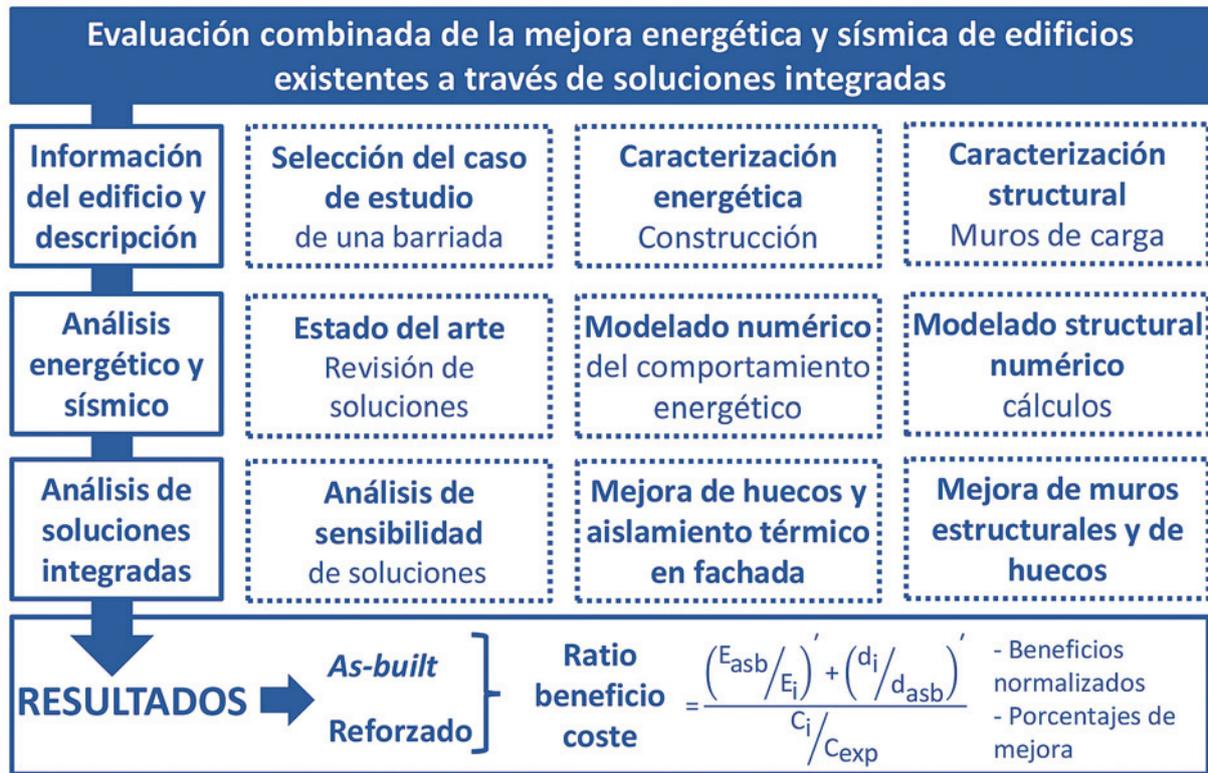


Figura 10.1. Metodología general seguida a lo largo de todo el trabajo de investigación

como el beneficio (B) de cada actuación dividido por el coste (C) de construcción. Esta relación beneficio-coste permitirá definir las soluciones con mayores índices de mejora y mejores índices de costes para ambos PR. Una vez determinadas las configuraciones individuales óptimas para cada PR, posteriormente, se han combinado e integrado entre sí.

El coste de construcción de cada configuración se ha calculado mediante una medición exhaustiva del proceso de construcción. Para ello, se ha empleado una base de datos de coste actualizada y extensamente empleada en España (CYPE Ingenieros S.A., 2016). Esta base de datos tiene en cuenta la duración de las obras, la mano de obra, los costes indirectos, el beneficio industrial y los costes de los materiales. Se determina un índice de coste ($C = C_i/C_{exp}$) expresado como la relación entre el coste de construcción de la solución analizada (i) y los costes de la más cara (exp). Este índice de costes se usa posteriormente junto con los índices de mejora del desempeño energético y sísmico.

El beneficio se ha calculado como la mejora de las prestaciones energéticas y sísmicas. La relación de mejora sísmica ($B_s = d_i/d_{asb}$) se obtiene dividiendo el ratio de capacidad-demanda (CDR) sísmica de la solución (i) por el CDR del estado construido (asb). El cálculo del CDR de cada solución se ha determinado en los capítulos anteriores y se obtiene a partir de la aplicación del método N2 (Fajfar y Gašperšič, 1996). Este método compara la respuesta estructural frente a la demanda sísmica de la zona y es el proceso que se establece en la normativa sísmica europea, el Eurocódigo-8 (AENOR, 2010). La mejora energética ($B_E = E_{asb}/E_i$) viene determinada por el cociente entre la demanda energética (kWh/año) del estado construido y la demanda de la i solución analizada.

10.3. RESULTADOS DEL ANÁLISIS INDIVIDUAL

En la figura 10.2 se muestran los resultados obtenidos al calcular el beneficio de cada PR y los costes de cada configuración combinada (PR_1 y PR_2). C ha tenido en cuenta los costes de cada PR con el fin de obtener para un único C, dos mejoras distintas.

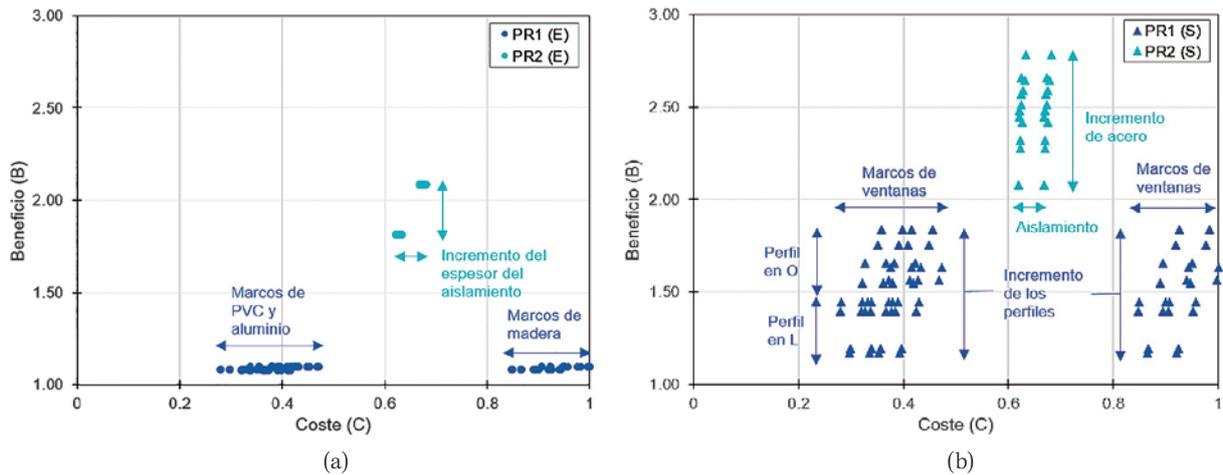


Figura 10.2. Beneficios energético (a) y sísmico (b) comparados con los costes de construcción de cada configuración analizada

10.3.1. Resultados de la mejora energética

En cuanto al análisis de la relación B/C de los diferentes PR basados en el comportamiento energético, se puede observar que las mayores relaciones de beneficios se han obtenido para el E- PR_2 . Este consiste en la implementación del sistema compuesto de aislamiento térmico externo (ETICS) en la fachada. El E- PR_2 ha obtenido valores de B_E que oscilan entre 1,86 y 2,05. En el caso de E- PR_1 , se han obtenido valores inferiores de B_E , que oscilan entre 1,08 y 1,10. Sin embargo, E- PR_1 ha dado como resultado valores de C considerablemente más bajos en comparación con PR_2 . Particularmente, para el caso de E- PR_1 , los resultados muestran que se pueden diferenciar claramente dos grupos de hipótesis. El primero engloba las soluciones de carpintería de madera y el otro, los marcos de aluminio y PVC. A pesar de tener B_E similares, los marcos de madera son significativamente más caros que los del otro grupo. En el caso de los sistemas de acristalamiento, las soluciones que incluyen vidrios de baja emisividad aumentan considerablemente el C, obteniendo un B_E despreciable.

En cuanto a E- PR_2 , la implementación de material de doble espesor de aislamiento produce los mayores beneficios. Estas soluciones son las más rentables debido al bajo incremento de coste de construcción frente a un B_E muy superior al resto. El cambio de tipo de material aislante, de poliestireno expandido (EPS) a lana de roca, no implica una variación significativa de los costes ni del beneficio, ya que ambos materiales presentan una transmitancia térmica similar.

Por tanto, las soluciones con mayor relación B/C han sido, de mayor a menor, E-W1, E-W5 y E-F2, E-F5. En el caso de las soluciones E- PR_1 , estas hipótesis han empleado carpintería de

aluminio y PVC (materiales mayoritariamente utilizados en la edificación residencial en España por su óptima relación rendimiento energético/coste) y doble acristalamiento estándar 4/6/4. En general, han obtenido valores de B_E similares a la vez que han sido las soluciones más baratas. Finalmente, con respecto a E-PR₂, E-F2 y E-F5 añaden la mayor cantidad de aislamiento térmico, lo que a su vez hace que estas soluciones sean las más beneficiosas y óptimas. Como se ha obtenido anteriormente en el análisis *as-built* del edificio caso de estudio, las soluciones no se ven afectadas considerablemente por la orientación, la tipología de viviendas y la situación urbanística de las manzanas.

Las soluciones con las relaciones B/C más altas de ambos PR se han combinado e integrado. Los resultados de esta combinación se dibujan en la figura 10.3. Al combinarlos, los resultados muestran que las mejoras de rendimiento son sobresalientes en comparación con los resultados obtenidos individualmente, alcanzando índices de mejora de hasta el 336,7%. En total, se han evaluado exhaustivamente 16 configuraciones de E-PR₃.

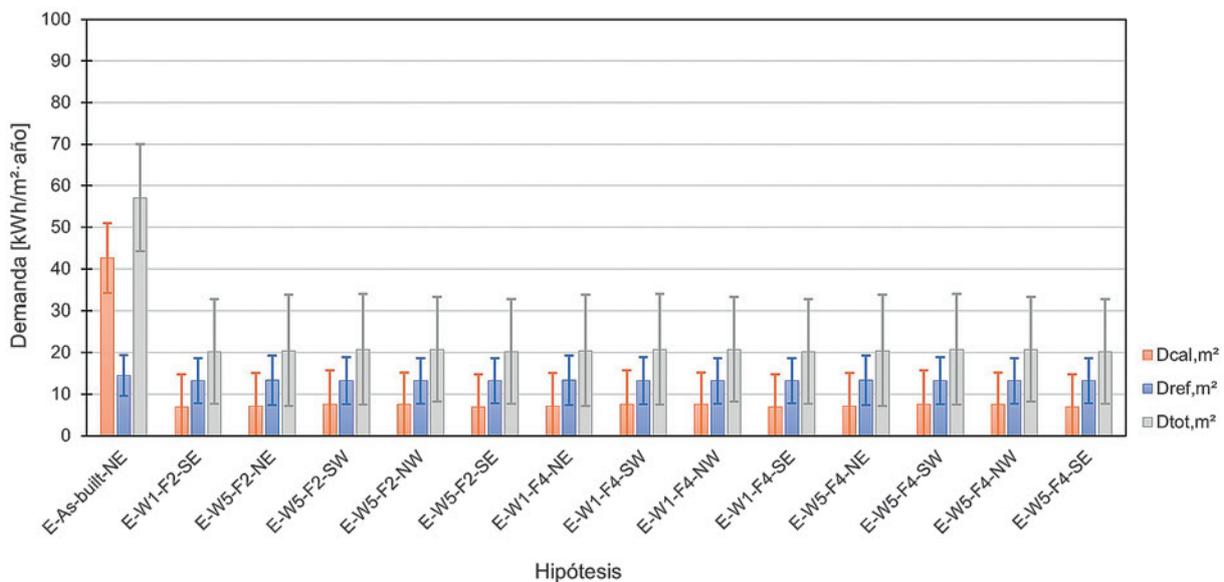


Figura 10.3. Combinación de la E-PR. Valores de demanda térmica media anual por m², según orientación de las soluciones optimizadas

10.3.2. Resultados de la mejora sísmica

En el caso de la mejora sísmica, se puede observar que los mayores ratios de beneficios se han obtenido para S-PR₂, la adición de mallas de acero en muros. S-PR₂ ha obtenido valores de B_S que oscilan entre 2,08 y 2,88. En el caso de S-PR₁, se han obtenido valores inferiores de B_S , que oscilan entre 1,17 y 1,84. Sin embargo, este último S-PR ha obtenido valores de C considerablemente más bajos en comparación con S-PR₂, siendo hasta el 70% de S-PR₂. En el gráfico se pueden observar dos líneas separadas en vertical. Estas se refieren a los diferentes costes derivados del incremento del aislamiento térmico. De este primer análisis se ha obtenido que los perfiles en O tienen mejores relaciones beneficio-coste que la adición de perfiles en L. Además, se ha obtenido que no

se encuentran diferencias significativas en los valores de C entre todas las soluciones de $S-PR_2$. Sin embargo, el B_s mejora considerablemente cuando se incrementa la cantidad de material de refuerzo. Se ha obtenido que las soluciones con mayor relación B/C han sido de mayor a menor S-W8, S-W7, S-W1 y S-F8, S-F7, S-F10. En el caso de S-W8 y S-W7, estas soluciones agregan la sección más baja de perfiles en O en huecos de fachada y con diferentes tipos de material de acero. En estos casos se han obtenido valores moderados de B_s , pero han resultado ser las soluciones más económicas. S-W1 es la siguiente solución más económica. S-F8 y S-F7 agregan la mayor cantidad de acero de en mallas de refuerzo, lo que resultó en las soluciones más beneficiosas y óptimas. S-F10 es la próxima solución que agrega más material de refuerzo.

Una vez determinadas las soluciones óptimas para cada PR evaluado por separado, se han combinado, dando lugar a $S-PR_3$. Los resultados de esta combinación se representan en la figura 10.4. En total, se han evaluado exhaustivamente 9 configuraciones $S-PR_3$. Combinando $S-PR_1$ y $S-PR_2$, las mejoras de rendimiento han sido sobresalientes respecto a los resultados obtenidos individualmente, alcanzando ratios de B_s de hasta el 250 %, con un mínimo incremento del coste.

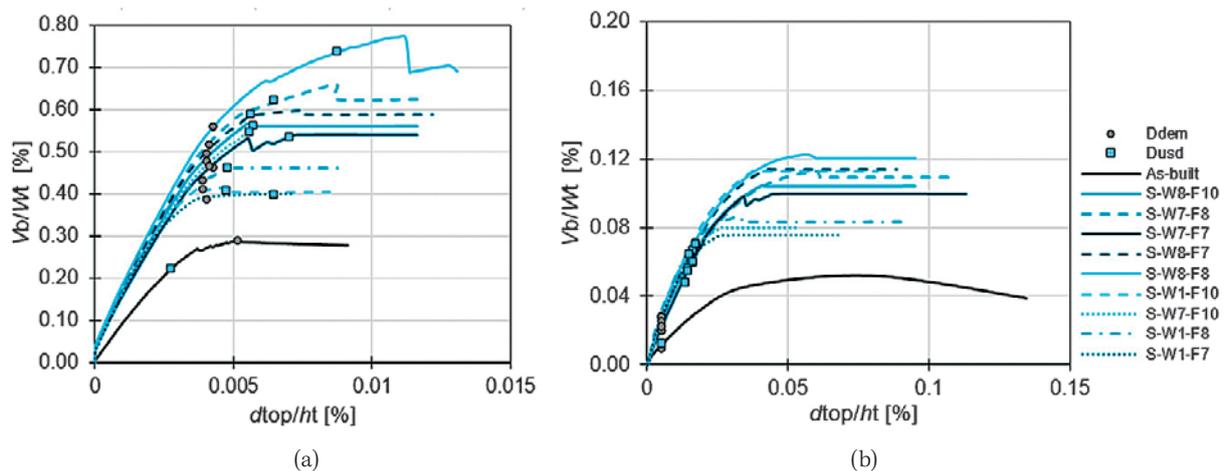


Figura 10.4. Curvas de capacidad para el sistema de un grado de libertad normalizadas, considerando las soluciones de $S-PR_3$ en la dirección X (a) e Y (b) del edificio

10.4. RESULTADOS DEL ANÁLISIS COMBINADO E INTEGRADO

En esta sección se evalúa la mejora simultánea del comportamiento sísmico y energético, así como los costes de construcción. Como se ha realizado anteriormente, se propone una relación beneficio-coste. En este caso, el beneficio derivado de cada mejora del rendimiento se ha normalizado. Esto se ha hecho con el fin de evitar ratios de mejora excesivos y establecer un peso similar a cada actuación. Los resultados de la evaluación combinada, PR_3 , se representan en la figura 10.5.

En el caso del B_s , existe una diferencia considerable en la relación beneficio-coste de las soluciones que agregan valores menores e intermedios de material de refuerzo que aquellas que agregan cantidades mayores. Se han obtenido índices de B_s significativos si la cantidad de material de refuerzo se incrementa hasta cierto punto. En este caso, las soluciones que han presentado

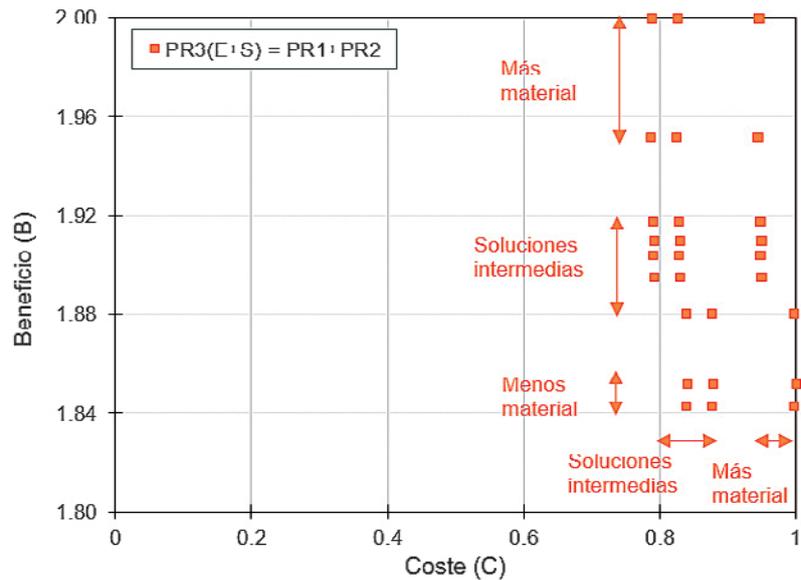


Figura 10.5. Beneficio y coste energético-sísmico combinado de cada configuración integrada de PR_3 considerada

valores más altos de B_s , han sido las que añadían mayor cantidad de material de refuerzo en muros y las que añadían menor sección de perfiles en O en huecos. Esto se debe a los valores insignificantes de C entre las soluciones S- PR_2 y el bajo C de los perfiles O en comparación con la relación de beneficios moderada. Combinadas con E-PR, estas soluciones han obtenido las más altas relaciones beneficio-coste.

10.5. CONCLUSIONES

Este trabajo se ha centrado en la evaluación de nuevas técnicas integradas y combinadas de rehabilitación sísmica y energética definidas específicamente para edificios de muros de carga existentes. Para ello, las soluciones se han diseñado a partir de un caso de estudio (que no cumple con los requerimientos sísmicos y energéticos establecidos en las normativas actuales), tras la evaluación energética y sísmica de su estado *as-built*. Por ello, y de acuerdo al análisis del edificio previo, los PR propuestos se han centrado en la mejora del comportamiento sísmico y energético de muros y huecos en fachada. La novedad de este trabajo se basa en el diseño de soluciones de rehabilitación energética y sísmica realizadas en una única actuación, compatibles, no invasivas y complementarias aplicadas a las fachadas de los edificios, teniendo en cuenta: los efectos del entorno urbano, los requerimientos sísmicos y energéticos (prescritos en los códigos de construcción y estructurales vigentes) y la reducción de costes. El análisis de beneficio-coste ha permitido obtener las configuraciones óptimas para realizar la combinación e integración de soluciones así como su jerarquización en función del beneficio y el coste.

Pormenorizadamente, no se encuentran diferencias significativas en los valores de C entre todas las soluciones de S- PR_2 . En el caso de S- PR_1 , las soluciones óptimas han sido aquellas que añadían mayor cantidad de refuerzo estructural. Esta conclusión también se obtiene para S- PR_2 . Sin embargo, en ese caso, esto se debe a las diferencias poco significativas en los costes entre

estas soluciones. Los resultados obtenidos para la evaluación individual se han observado posteriormente en la evaluación combinada, PR₃.

Para actuaciones de rehabilitación en edificios residenciales sujetos a presupuestos reducidos, la E-PR₂ parece ser la solución más rentable, a pesar del mayor esfuerzo económico inicial. Esta conclusión también se aplica a la mejora del comportamiento sísmico. Al realizar una rehabilitación combinada de cambio de huecos (marcos y vidrios) a la vez que se incluye aislamiento en el exterior de las fachadas da como resultado una mejora del rendimiento energético del edificio de más del 300 % respecto a las reformas individuales (E-PR₁ o E-PR₂). Se han obtenido conclusiones similares para el comportamiento sísmico.

Particularmente, para el caso objeto de estudio, se ha obtenido que la orientación, la tipología edificatoria, las relaciones de la sección de la calle y la situación urbanística no afectan al comportamiento térmico de las viviendas del barrio. Sin embargo, estos factores afectan a las viviendas por planta dentro de una misma manzana.

A la luz de los resultados, este trabajo concluye que la rehabilitación sísmico-energética multiobjetivo de edificios existentes puede dar lugar a sinergias, reduciendo el coste económico de las soluciones debido a la reducción de tiempos de instalación y la necesidad de mano de obra, materiales y recursos. Esto puede permitir la mejora del comportamiento sísmico/estructural de los edificios en caso de un evento sísmico futuro de hasta un 240 % en comparación con las obras de rehabilitación puramente energéticas.

10.6. REFERENCIAS

- AENOR (2010): *Eurocódigo 8: Proyecto de estructuras sismorresistentes*. España. <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma/?c=N0060451>
- CYPE Ingenieros S.A. (2016): *Arquimedes software*. España. <https://info.cype.com/es/software/arquimedes/>
- Fajfar, P. y Gašperšič, P. (1996): «The N2 method for the seismic damage analysis of RC buildings», *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 25(1), 31-46.
- Requena-García-Cruz, M. V., Morales-Esteban, A., Durand-Neyra, P. y Estevao, J. M. C. (2019): «An index-based method for evaluating seismic retrofitting techniques. Application to a reinforced concrete primary school in Huelva», *Plos One*, 14(4), e0215120. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0215120>

Índice de tablas

Tabla 1.1.	Acciones que componen la metodología seguida en el proyecto	17
Tabla 3.1.	Clasificación de las medidas de mejora de la eficiencia energética. Elaboración propia.....	44
Tabla 4.1.	Clasificación de los sistemas integrados propuestos en la bibliografía consultada y otros deducidos a partir de ella. Elaboración propia	74
Tabla 5.1.	Tabla comparativa de superficies mínimas según normativa de vivienda social vigente en Andalucía para vivienda de 3 dormitorios y superficies de las diferentes tipologías de vivienda de El Plantinar. Julia Díaz-Borrego	113
Tabla 6.1.	Profundidades de muro de los distintos estratos a este y oeste de la barriada. Elaboración propia.....	128
Tabla 6.2.	Propiedades geotécnicas de cada estrato	131
Tabla 6.3.	Profundidad del nivel freático. Elaboración propia.....	132
Tabla 7.1.	Propiedades mecánicas del comportamiento no lineal de muros de mampostería de ladrillo cerámico	139
Tabla 7.2.	Propiedades mecánicas seleccionadas para el análisis numérico.....	140
Tabla 8.1.	Caracterización constructiva de los edificios. Julia Díaz-Borrego	153
Tabla 8.2.	Equipos empleados en el análisis termográfico de este estudio.....	155
Tabla 8.3.	Condiciones de la simulación energética.....	160
Tabla 8.4.	Valores de la demanda térmica anual obtenidos para la configuración actual de los bloques de viviendas.....	162
Tabla 9.1.	Modelos definidos para el análisis de sensibilidad.....	168
Tabla 9.2.	Parámetros variados en el análisis de sensibilidad del comportamiento sísmico	169
Tabla 9.3.	Modelos analizados en el análisis de sensibilidad del comportamiento energético	171

Índice de figuras

Figura 2.1. (a) Consumo de energía en España respecto al consumo total de Europa; (b) Consumo en kilos de petróleo en España y Europa por año.....	26
Figura 2.2. Porcentaje de edificios residenciales con certificado de eficiencia energética según diversos países europeos.....	26
Figura 2.3. Mapa de peligrosidad sísmica de España 2015 (Instituto Geográfico Nacional, s. f.).....	27
Figura 2.4. Edificios construidos en Andalucía según el año de construcción (Instituto Nacional de Estadística, 2022).....	28
Figura 2.5. (a) Consumo en kilos de petróleo por sector y año; (b) Estructura del consumo de energía final por sectores en 2020.....	29
Figura 2.6. (a) Distribución del consumo del sector residencial andaluz por fuentes en 2020; (b) Evolución de la producción de emisiones de CO2 en Andalucía.....	29
Figura 2.7. Zonificación climática para los municipios andaluces para la situación de (a) invierno y (b) verano.....	30
Figura 3.1. Incorporación de aislamiento por el exterior del cerramiento existente (izquierda) e incorporación de aislamiento en cubierta plana (derecha). Elaboración propia.....	45
Figura 3.2. Fachada ventilada de juntas abiertas. Elaboración propia.....	46
Figura 3.3. Diferentes estrategias de protección solar. Elaboración propia.....	48
Figura 3.4. Representación esquemática del funcionamiento del invernadero (izquierda) y el muro Trombe (derecha). Elaboración propia basada en la figura 4.1. de Neila González (2004).....	49
Figura 3.5. Ejemplo de muro Trombe con estrategias para evitar el sobrecalentamiento. Elaboración propia.....	50
Figura 3.6. Clasificación de las estrategias de rehabilitación sísmica aplicadas a edificios de estructura de HA.....	52
Figura 3.7. Rigidización mediante pantallas de hormigón armado.....	53
Figura 3.8. Rigidización mediante cruces o diagonales.....	54
Figura 3.9. Confinamiento de pilares mediante camisa de hormigón armado, acero y FRP...	55
Figura 3.10. Refuerzo mediante mallas de acero.....	58
Figura 3.11. Recercado de hueco mediante perfiles de acero laminado.....	59
Figura 3.12. Diferentes configuraciones de refuerzo mediante bandas de FRP.....	60
Figura 4.1. Sistema exoesqueleto de contrafuertes (izquierda) y sistema exoesqueleto de caja rígida (derecha). Elaboración propia basada en la figura 5 de Marini <i>et al.</i> (2017).....	76

Figura 4.2. Sistema integrado formado por TRM y aislamiento térmico. Elaboración propia basada en la figura 1 de Triantafyllou <i>et al.</i> (2018).....	79
Figura 5.1. Vuelos históricos de Sevilla: (de izq. a dcha.) fotografías aéreas de 1956, 1969 y 1977. Visor de Vuelos Históricos de la Gerencia de Urbanismo. Julia Díaz-Borrego.....	93
Figura 5.2. Vista de pájaro en la que se aprecia la relación de la barriada con el contexto urbano. 2022. Julia Díaz-Borrego.....	95
Figura 5.3. Fotografías de los límites de la barriada y su relación con el entorno próximo. 2022. Julia Díaz-Borrego.....	95
Figura 5.4. Fotografía del límite norte de la barriada y su encuentro y relación con las construcciones más recientes. 2022. Julia Díaz-Borrego.....	95
Figura 5.5. Localización urbana del objeto de estudio. Relación de la barriada con el Patrimonio Municipal. Análisis de la barriada de El Plantinar (Sevilla). Julia Díaz-Borrego.....	96
Figura 5.6. Planimetría de la edificación del entorno de la barriada de El Plantinar por usos. Datos del catastro, 2021. Fotografías Calle Virgen del Sol. Julia Díaz-Borrego.....	97
Figura 5.7. Planimetría de la edificación del entorno de la barriada de El Plantinar por usos y sección genérica del viario actual. 2022. Julia Díaz-Borrego.....	98
Figura 5.8. Localización urbana del objeto de estudio. Accesibilidad y espacio público a escala urbana. Análisis de la barriada de El Plantinar (Sevilla). Julia Díaz-Borrego.....	99
Figura 5.9. Planimetría de la edificación del entorno de la barriada de El Plantinar por alturas de construcción. Datos del catastro, 2021. Julia Díaz-Borrego.....	100
Figura 5.10. Sección genérica detallada del viario actual de la barriada de El Plantinar. Julia Díaz-Borrego.....	101
Figura 5.11. Fotografías del estado actual del viario y los espacios libres de la barriada de El Plantinar, 2022. Julia Díaz-Borrego.....	102
Figura 5.12. Fotografía aérea de área de la barriada de El Plantinar y su entorno urbano, 2008. Vuelos Históricos de Sevilla, Gerencia de Urbanismo. Julia Díaz-Borrego...	105
Figura 5.13. Planimetría proyecto original de la barriada de El Plantinar, 1960, A. Delgado Roig y A. Balbontín de Orta ICAS-SAHP, Archivo Municipal de Sevilla, n.º 60392.....	106
Figura 5.14. Planimetría proyecto original de la barriada de El Plantinar, 1960, A. Delgado Roig y A. Balbontín de Orta ICAS-SAHP, Archivo Municipal de Sevilla, n.º 60392.....	106
Figura 5.15. Ordenación actual del conjunto residencial El Plantinar. Diferenciación de bloques según tipología de vivienda. Julia Díaz-Borrego.....	107
Figura 5.16. Tipología de vivienda «pequeña» de El Plantinar con superficies y distribuciones. Julia Díaz-Borrego.....	107
Figura 5.17. Tipología de vivienda «mediana» de El Plantinar con superficies y distribuciones. Julia Díaz-Borrego.....	108

Figura 5.18. Tipología de vivienda «grande» de El Plantinar con superficies y distribuciones. Julia Díaz-Borrego	109
Figura 5.19. Fotografías del estado actual de la barriada de El Plantinar: análisis de transformaciones y estado de conservación, 2022. Julia Díaz-Borrego.....	110
Figura 5.20. Evolución migratoria de El Plantinar en el período 2011-2020. Datos del padrón (www.sevilla.org). Julia Díaz-Borrego	111
Figura 5.21. Evolución migratoria de El Plantinar en el período 2011-2020. Datos del padrón (www.sevilla.org). Julia Díaz-Borrego	111
Figura 5.22. Titular periódico alerta sobre conflictos sociales en El Plantinar. Sevilla, 01/02/22 (EUROPA PRESS)	112
Figura 5.23. Edad población residente en El Plantinar (2021). INE, urban audit 2021. Julia Díaz-Borrego	114
Figura 5.24. Evolución tamaño medio de los hogares en El Plantinar en el período 2010-2020 (INE, urban audit 2021). Tamaño y composición de los núcleos familiares de El Plantinar (2021). Datos del padrón (www.sevilla.org). Julia Díaz-Borrego	115
Figura 6.1. Ubicación de la barriada bajo estudio, en azul oscuro. En azul claro, barrio del Nervión. En fucsia, distrito Sur de Sevilla. En rojo, barrio de El Plantinar. Imagen adaptada a partir de Google Maps y Google Earth.....	120
Figura 6.2. Barriada de El Plantinar, en relieve. Imagen adaptada a partir de Google Earth.....	120
Figura 6.3. Cotas de superficie de la zona de El Plantinar (extraído de topographic-map.com).....	121
Figura 6.4. Mapa geológico 1:50.000, Sevilla (984). Barrio de El Plantinar en gris y rojo. Modificación con fuente IGME	122
Figura 6.5. Aluvial y diluvial de Sevilla (IGME).....	126
Figura 6.6. Ubicaciones de los estudios geotécnicos existentes empleados en el estudio (azul) y del centro de la barriada de El Plantinar (morado). Estudio de referencia en rojo	127
Figura 6.7. Puntos de cálculo para la interpolación espacial (a) y profundidad de muro (en metros) de los estratos para cada uno de ellos (b)	129
Figura 6.8. Corte estratigráfico, ilustración de Pablo Zapico Blanco.....	130
Figura 7.1. Idealización del método del pórtico equivalente para el análisis numérico de edificios de muros de carga.....	135
Figura 7.2. Localización de la barriada e identificación de los tipos estructurales	137
Figura 7.3. Configuración de los tipos edificatorios y estructurales identificados en la barriada.....	137
Figura 7.4. (a) Configuración estructural del tipo 1. (b) Fachadas principal y trasera del tipo 1. (c) Detalles constructivos	138
Figura 7.5. Comportamiento del macro-elemento y tipos de fallo.....	141
Figura 7.6. Modos de vibración del caso de estudio.....	143

Figura 7.7. Curva de capacidad normalizada expresada en SDOF con la demanda sísmica y el daño sísmico esperados. Daño esperado para cada panel de las fachadas principal y trasera para el paso correspondiente a la demanda sísmica.....	144
Figura 8.1. Realización de ensayo de despresurización en un recinto (Campano Laborda, 2015).....	152
Figura 8.2. Ubicación del edificio objeto de estudio en la barriada de El Plantinar. Julia Díaz-Borrego	154
Figura 8.3. Termogramas tomados durante la inspección	156
Figura 8.4. Termogramas tomados durante la inspección	157
Figura 8.5. Modelo computacional desarrollado para la evaluación del rendimiento energético. Julia Díaz-Borrego	159
Figura 8.6. Valores promedios anuales de la demanda térmica por m ² según la orientación. Julia Díaz-Borrego	161
Figura 8.7. Demanda térmica anual por vivienda. Julia Díaz-Borrego.....	162
Figura 9.1. Detalles conceptuales de las soluciones de refuerzo integrado. Refuerzo de muros con mallas de acero e incorporación de aislamiento térmico. Implementación de perfiles estructurales en marcos de huecos y cambio de marcos y vidrios de ventanas	167
Figura 9.3. Curvas de capacidad para el sistema de un grado de libertad normalizadas, considerando las soluciones de S-PR ₂ en la dirección X (a) e Y (b) del edificio.....	172
Figura 9.2. Curvas de capacidad para el sistema de un grado de libertad normalizadas, considerando las soluciones de S-PR ₁ en la dirección X (a) e Y (b) del edificio.....	172
Figura 9.4. Demanda térmica anual por m ² de las hipótesis (valores medios de los diferentes modelos variando las orientaciones y por hipótesis)	173
Figura 9.5. Desviación de la demanda por m ² (media, máxima y mínima) respecto al estado <i>as-built</i>	174
Figura 10.1. Metodología general seguida a lo largo de todo el trabajo de investigación.....	179
Figura 10.2. Beneficios energético (a) y sísmico (b) comparados con los costes de construcción de cada configuración analizada	180
Figura 10.3. Combinación de la E-PR. Valores de demanda térmica media anual por m ² , según orientación de las soluciones optimizadas	181
Figura 10.4. Curvas de capacidad para el sistema de un grado de libertad normalizadas, considerando las soluciones de S-PR ₃ en la dirección X (a) e Y (b) del edificio.....	182
Figura 10.5. Beneficio y coste energético-sísmico combinado de cada configuración integrada de PR ₃ considerada.....	183

Los autores de este libro pertenecen a los siguientes departamentos de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de la Universidad de Sevilla: Estructuras de Edificación e Ingeniería del Terreno, Construcciones Arquitectónicas I e Historia, Teoría y Composición Arquitectónicas. Los autores son miembros de los grupos de investigación: TEP-107: Estructuras y Geotecnia; TEP-130: Arquitectura, Patrimonio y Sostenibilidad: Acústica, Iluminación, Óptica y Energía; y, HUM-666: Ciudad, Arquitectura y Patrimonio Contemporáneos. Este libro es resultado de un proyecto de investigación dirigido por el investigador responsable del grupo TEP-107, Antonio Morales Esteban.



Colección Arquitectura
Editorial Universidad de Sevilla

Soluciones integradas de fachada para la mejora energética y sísmica de barriadas de antigua construcción

Gran parte de las grandes barriadas residenciales de Andalucía se construyeron a lo largo del siglo XX, antes de la aparición de normativas de construcción y sísmicas restrictivas. Como resultado, la mayor parte de estos edificios presentan niveles de eficiencia energética, confort térmico y calidad ambiental muy por debajo de los estándares actuales; además, muchos no cumplen con los requerimientos sísmicos actuales.

Por ello, el proyecto RENERSIS (Cálculo y diseño de soluciones de fachada para la mejora energética y sísmica de grandes barriadas de antigua construcción) tiene como finalidad la mejora de la eficiencia energética y del comportamiento sísmico de edificios de viviendas en grandes barriadas de antigua construcción en Andalucía. A tal fin se han diseñado y calculado soluciones integradas que consideran ambos aspectos. Este objetivo se pretende conseguir a partir del diseño y de la evaluación de soluciones compatibles, no invasivas y complementarias aplicadas en la fachada de estos edificios. La metodología de trabajo se ha aplicado a la barriada sevillana de El Plantinar, como caso representativo del parque inmobiliario construido en Andalucía.

Los resultados de esta investigación han demostrado que la rehabilitación sísmico-energética multiobjetivo de edificios existentes puede dar lugar a sinergias, reduciendo el coste económico de las soluciones. Esta situación se consigue gracias a la reducción del tiempo de instalación, de la de mano de obra, de los materiales y de los recursos. Hay que destacar también que se eliminan incompatibilidades y se evita el riesgo de que una intervención puramente energética se vea dañada o arruinada por un terremoto futuro. Se ha probado que la rehabilitación sísmica, cuando se realiza junto a una rehabilitación energética, produce un incremento de coste despreciable y permite la mejora del comportamiento sísmico/estructural de los edificios, en caso de terremoto, de hasta un 240%.



Junta de Andalucía

Consejería de Fomento, Infraestructuras y
Ordenación del Territorio



ISBN 978-84-472-2412-8



9 788447 224128