

TESIS DOCTORAL

Estrategias para lograr Edificios de Consumo de Energía casi Nulo - NZEB. Edificios con uso residencial vivienda en el clima cálido mediterráneo

Manuel Jesús Romero Rincón

2022



Dr. D. Pedro Ginés Vicente Quiles

CODIRECTOR/A:

Dr. D. Francisco Javier Aguilar Valero



UNIVERSIDAD MIGUEL HERNÁNDEZ DE ELCHE

Programa de Doctorado en
TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES Y DE
TELECOMUNICACIÓN



La presente Tesis Doctoral, titulada <<*Estrategias para lograr Edificios de Consumo de Energía casi Nulo. Edificios con uso residencial vivienda en el clima cálido mediterráneo*>>, se presenta bajo la modalidad de **tesis por compendio** de las siguientes **publicaciones**:

- M. J. Romero, F. Aguilar, P. G. Vicente, *Analysis of design improvements for thermal bridges formed by double-brick façade and intermediate slabs for nZEB buildings in Spain*. Journal of Building Engineering, 44 (2021) 103270.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103270>





El Dr. D. Pedro Ginés Vicente Quiles, director y el Dr. D. Francisco Javier Aguilar Valero, codirector, de la tesis doctoral titulada <<Estrategias para lograr Edificios de Consumo de Energía casi Nulo. Edificios con uso residencial vivienda en el clima cálido mediterráneo>>,

INFORMAN:

Que D. Manuel Jesús Romero Rincón ha realizado, bajo nuestra supervisión, el trabajo titulado <<Estrategias para lograr Edificios de Consumo de Energía casi Nulo. Edificios con uso residencial vivienda en el clima cálido mediterráneo>>, conforme a los términos y condiciones definidos en su Plan de Investigación y de acuerdo al Código de Buenas Prácticas de la Universidad Miguel Hernández de Elche, cumpliendo los objetivos previstos de forma satisfactoria para su defensa pública como tesis doctoral.

Lo que firmamos para los efectos oportunos, en Elche, a 27 de septiembre de 2022

Director de la tesis

Dr. D. Pedro Ginés Vicente Quiles

Codirector de la tesis

Dr. D. Francisco Javier Aguilar Valero



El Dr. D. *Óscar Reinoso García*, Coordinador del Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales y de Telecomunicación

INFORMA:

Que D. Manuel Jesús Romero Rincón ha realizado, bajo la supervisión de nuestro Programa de Doctorado, el trabajo titulado <<Estrategias para lograr Edificios de Consumo de Energía casi Nulo. Edificios con uso residencial vivienda en el clima cálido mediterráneo>>, conforme a los términos y condiciones definidos en su Plan de Investigación y de acuerdo al Código de Buenas Prácticas de la Universidad Miguel Hernández de Elche, cumpliendo los objetivos previstos de forma satisfactoria para su defensa pública como tesis doctoral.

Lo que firmo para los efectos oportunos, en Elche, a 28 de septiembre de 2022

Prof. Dr. D. *Óscar Reinoso García*

Coordinador del Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales y de
Telecomunicación

Resumen

Uno de los retos más importantes de la sociedad actual está relacionado con la mitigación y la adaptación al cambio climático. Para ello, debemos trabajar en la reducción del consumo de energía asociado a todas las actividades humanas y en maximizar el empleo de fuentes de energía renovables.

Según la Comisión Europea, el 41% del consumo de energía en la Unión se produce en los edificios. En España dicho consumo representa el 31,9% del total, dividiéndose en un 18,3% en los edificios con uso residencial vivienda y en un 13,6% en los del sector terciario.

Para mejorar los edificios, la Unión Europea estableció la exigencia de que todos los edificios construidos a partir del 1 de enero de 2021 sean de Consumo de Energía casi Nulo o NZEB. Para lograr que los edificios con uso residencial vivienda sean NZEB, existen diversas estrategias que fundamentalmente pasan por la reducción de las demandas de energía de calefacción y refrigeración, mediante la mejora de la calidad térmica de la envolvente térmica (alto nivel de aislamiento térmico; marcos y vidrios altamente aislantes; eliminación de puentes térmicos; ventilación mecánica; control solar; estanqueidad al aire) y también por la mejora de la eficiencia energética de las instalaciones térmicas y el empleo de energías renovables.

La mayoría de las estrategias indicadas son tecnologías ya desarrolladas y probadas suficientemente por la industria de la construcción. Sin embargo, siguen existiendo dos puntos débiles: **el tratamiento adecuado de los puentes térmicos y la mejora de la hermeticidad al aire de los edificios**. Esas son las **dos líneas de investigación** que se analizan en el trabajo llevado a cabo en esta tesis.

Para la **estrategia de mejora de los puentes térmicos** se analiza en detalle aquellos que generan un mayor flujo de calor y, en consecuencia, los que tienen más impacto en la demanda energética de los edificios. Se trata de los puentes térmicos generados por el encuentro de fachadas y forjados intermedios: puentes térmicos de frentes de forjado. En todos los casos analizados la solución de fachada es la tradicional en el sur de Europa: doble hoja cerámica con aislamiento térmico intermedio.

Se analizan dos situaciones: fachadas con hoja exterior de ladrillo cerámico caravista y fachadas con acabado exterior de mortero monocapa. Para las primeras se han diseñado tres medidas de mejora y para las segundas una medida de mejora.

El proceso de análisis se ha realizado en dos etapas. En la primera se estudia la reducción del valor de transmitancia térmica lineal del puente térmico realizando un cálculo por elementos finitos mediante el software THERM y en la segunda se estudia el impacto en la reducción de los indicadores de edificios NZEB realizando simulaciones energéticas en tres ciudades españolas (Alicante, Barcelona y Madrid) mediante el software Energy Plus.

Para seleccionar dichas ciudades se ha utilizado el criterio de aquellas cuyas zonas climáticas tengan el mayor número de viviendas ya construidas y el mayor número de viviendas construidas anualmente.

En el caso de las **fachadas con hoja exterior caravista**, la máxima reducción alcanzada en los indicadores NZEB es la siguiente:

- Alicante (zona climática B4): 22,6% en la demanda de calefacción (primer indicador); 20,4% en el consumo de energía primaria total (segundo indicador); 20,7% en el consumo de energía primaria no renovable (tercer indicador) y 21,1% en las emisiones de CO₂.
- Barcelona (zona climática C2): 18,5% en la demanda de calefacción (primer indicador); 15,5% en el consumo de energía primaria total (segundo indicador); 16,0% en el consumo de energía primaria no renovable (tercer indicador) y 16,4% en las emisiones de CO₂.
- Madrid (zona climática D3): 16,1% en la demanda de calefacción (primer indicador); 14,4% en el consumo de energía primaria total (segundo indicador); 14,6% en el consumo de energía primaria no renovable (tercer indicador) y 14,9% en las emisiones de CO₂.

La reducción en el valor de la transmitancia térmica lineal interior Ψ_i del puente térmico se sitúa entre un 20% y un 63,4%.

En el caso de las **fachadas con acabado exterior de mortero monocapa**, la reducción lograda en dichos indicadores es:

- Alicante (zona climática B4): 30% en la demanda de calefacción (primer indicador); 20,1% en el consumo de energía primaria total (segundo indicador); 21,3% en el consumo de energía primaria no renovable (tercer indicador) y 22,7% en las emisiones de CO₂.
- Barcelona (zona climática C2): 21% en la demanda de calefacción (primer indicador); 18,7% en el consumo de energía primaria total (segundo indicador); 19,1% en el consumo de energía primaria no renovable (tercer indicador) y 19,5% en las emisiones de CO₂.
- Madrid (zona climática D3): 19,8% en la demanda de calefacción (primer indicador); 17,7% en el consumo de energía primaria total (segundo indicador); 18% en el consumo de energía primaria no renovable (tercer indicador) y 18,4% en las emisiones de CO₂.

La reducción en el valor de la transmitancia térmica lineal interior Ψ_i del puente térmico se sitúa entre un 47,3% y un 75,4%.

Para la **estrategia de mejora de la hermeticidad al aire** de los edificios se han realizado 111 ensayos Blower Door en viviendas construidas entre los años 2020 y 2022 para

caracterizar los edificios de nueva construcción. Además, se ha planteado dos medidas de mejora en la hermeticidad y se ha aplicado en varias de las viviendas repitiendo el ensayo Blower Door. Con esos datos, se ha estudiado el impacto en la reducción de los indicadores NZEB realizando simulaciones energéticas en las tres ciudades españolas indicadas mediante el software Energy Plus.

La tasa de renovación de aire con una diferencia de presión de 50 Pa o n_{50} , obtenida mediante los ensayos Blower Door, tiene un valor medio, para las viviendas construidas con la práctica habitual, de $11,04 \text{ h}^{-1}$. Con las dos mejoras planteadas se logran valores medios de $5,38 \text{ h}^{-1}$ (reducción del 51,3 %) y de $1,09 \text{ h}^{-1}$ (reducción del 90,1 %).

Aplicando el valor medio de hermeticidad de $1,09 \text{ h}^{-1}$, la reducción alcanzada en los indicadores NZEB es la siguiente:

- Alicante (zona climática B4): 27,7 % en la demanda de calefacción (primer indicador); 21,7 % en el consumo de energía primaria total (segundo indicador); 22,5 % en el consumo de energía primaria no renovable (tercer indicador) y 23,3 % en las emisiones de CO_2 .
- Barcelona (zona climática C2): 24,8 % en la demanda de calefacción (primer indicador); 23,4 % en el consumo de energía primaria total (segundo indicador); 23,6 % en el consumo de energía primaria no renovable (tercer indicador) y 23,8 % en las emisiones de CO_2 .
- Madrid (zona climática D3): 23,4 % en la demanda de calefacción (primer indicador); 22,0 % en el consumo de energía primaria total (segundo indicador); 22,2 % en el consumo de energía primaria no renovable (tercer indicador) y 22,5 % en las emisiones de CO_2 .

Como conclusión final se puede indicar que las dos estrategias analizadas y el diseño de mejoras constructivas para ellas, contribuye a alcanzar los indicadores NZEB de los edificios con uso residencial vivienda.

Abstract

One of the most important challenges of today's society is related to how to mitigate and adapt to the effects of climate changes. To this end, we must work to reduce the energy consumption associated with all human activities and to maximize the use of renewable energy sources.

According to the European Commission, buildings account for 41% of energy consumption in the EU. In Spain, this consumption represents 31.9% of the total, 18.3% in residential buildings and 13.6% in the tertiary sector.

In order to improve buildings, the European Union established the requirement that all buildings constructed from 1 January 2021 must be Nearly Zero-Energy Building or NZEB. In order to achieve NZEB for residential buildings, there are various strategies in place, mainly involving the reduction of heating and cooling energy demands by improving the thermal quality of the thermal envelope (high level of thermal insulation; highly insulating window frames and glazing; elimination of thermal bridges; ventilation; solar control; air tightness) and also by improving the energy efficiency of the HVAC systems and the use of renewable energies.

Most of the above strategies are technologies that have already been sufficiently developed and tested by the building industry. However, there are still two weak points: **the adequate treatment of thermal bridges and the improvement of the air tightness of buildings**. These are the **two lines of research** that are analyzed in the work carried out in this thesis.

With regard to the **strategy for improving thermal bridges**, a detailed analysis is made of those that generate the greatest heat flow and, consequently, will have the greatest impact on the energy demand of buildings. These are the thermal bridges generated by the junction of façades and intermediate slabs: thermal bridges of slab fronts. In all the cases analyzed, the façade solution is the type traditionally used in southern Europe: double ceramic brick with intermediate thermal insulation.

Two situations are analyzed: façades with an external face brick and façades with a single-coat mortar exterior finish. Three improvement measures have been designed for the former and one for the latter.

The analysis process has been carried out in two stages. In the first one, the reduction of the linear thermal transmittance value of the thermal bridge is studied by performing a finite element calculation using the THERM software and in the second one, the impact on the reduction of NZEB building indicators is studied by performing energy simulations in three Spanish cities (Alicante, Barcelona and Madrid) using the Energy Plus software.

These cities were selected on the basis of those climatic zones with the highest number of dwellings already built and the highest number of dwellings built annually.

In the case of **face brick façade**, the maximum reduction achieved in the NZEB indicators is:

- Alicante (climate zone B4): 22.6% in heating demand (first indicator); 20.4% in total primary energy consumption (second indicator); 20.7% in non-renewable primary energy consumption (third indicator) and 21.1% in CO₂ emissions.
- Barcelona (climate zone C2): 18.5% in heating demand (first indicator); 15.5% in total primary energy consumption (second indicator); 16.0% in non-renewable primary energy consumption (third indicator) and 16.4% in CO₂ emissions.
- Madrid (climate zone D3): 16.1% in heating demand (first indicator); 14.4% in total primary energy consumption (second indicator); 14.6% in non-renewable primary energy consumption (third indicator) and 14.9% in CO₂ emissions.

The reduction in the value of the internal linear thermal transmittance Ψ_i of the thermal bridge is between 20% and 63.4%.

In the case of **façades with a single-coat mortar** exterior finish, the reduction achieved in the same indicators is:

- Alicante (climate zone B4): 30% in heating demand (first indicator); 20.1% in total primary energy consumption (second indicator); 21.3% in non-renewable primary energy consumption (third indicator) and 22.7% in CO₂ emissions.
- Barcelona (climate zone C2): 21% in heating demand (first indicator); 18.7% in total primary energy consumption (second indicator); 19.1% in non-renewable primary energy consumption (third indicator) and 19.5% in CO₂ emissions.
- Madrid (climate zone D3): 19.8% in heating demand (first indicator); 17.7% in total primary energy consumption (second indicator); 18% in non-renewable primary energy consumption (third indicator) and 18.4% in CO₂ emissions.

The reduction in the value of the internal linear thermal transmittance Ψ_i of the thermal bridge is between 47.3% and 75.4%.

For the strategy to **improve the air tightness of buildings**, 111 Blower Door tests were conducted on housing built between 2020 and 2022 to characterize new buildings. In addition, two airtightness improvement measures were proposed and applied in several of the dwellings by repeating the Blower Door test. These data have facilitated the study of the impact on the reduction of NZEB indicators through energy simulations employing the Energy Plus software in the three Spanish cities involved.

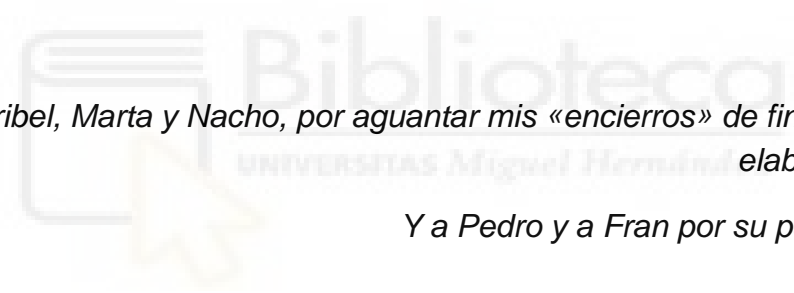
The average air change rate at a pressure difference of 50 Pa or n_{50} , obtained from the Blower Door tests, has an average value of 11.04 ACH for dwellings built according to standard practice. With the two proposed improvements, average values of 5.38 ACH (51.3 % reduction) and 1.09 ACH (90.1 % reduction) are achieved.

Applying the average tightness value of 1.09 ACH, the reduction achieved in the NZEB indicators for the cities of Alicante, Barcelona and Madrid is as follows:

- Alicante (climate zone B4): 27.7% in heating demand (first indicator); 21.7% in total primary energy consumption (second indicator); 22.5% in non-renewable primary energy consumption (third indicator) and 23.3% in CO2 emissions.
- Barcelona (climate zone C2): 24.8% in heating demand (first indicator); 23.4% in total primary energy consumption (second indicator); 23.6% in non-renewable primary energy consumption (third indicator) and 23.8% in CO2 emissions.
- Madrid (climate zone D3): 23.4% in heating demand (first indicator); 22% in total primary energy consumption (second indicator); 22.2% in non-renewable primary energy consumption (third indicator) and 22.5% in CO2 emissions.

In conclusion, it can be stated that the two strategies analyzed as well as the building improvements designed, are instrumental in achieving the NZEB indicators for residential buildings.





A mi familia, Maribel, Marta y Nacho, por aguantar mis «encierros» de fin de semana para elaborar este trabajo.

Y a Pedro y a Fran por su paciencia y apoyo.

Índice general

Listado de figuras	3
Listado de tablas.....	5
Listado de abreviaturas, símbolos y letras griegas	7
Capítulo 1. Introducción.....	10
1.1 Motivación.....	10
1.2 Antecedentes	13
Capítulo 2. Estado del arte.....	16
2.1 Estrategia de mejora de puentes térmicos	16
2.2 Estrategia de mejora de la hermeticidad al aire	21
2.3 Conclusiones	25
Capítulo 3. Objetivos de la tesis.....	28
3.1 Objetivo principal	28
3.2 Primera línea de investigación.....	28
3.2.1 Introducción.....	28
3.2.2 Objetivos	30
3.3 Segunda línea de investigación.....	30
3.3.1 Introducción.....	30
3.3.2 Objetivos	32
3.4 Publicaciones constitutivas de la tesis.....	32
Capítulo 4. Materiales y métodos. Mejora constructiva de puentes térmicos lineales de frentes de forjado.....	36
4.1 Puentes térmicos lineales en edificios.....	36
4.2 Puente térmico lineal con fachadas tradicionales con forjados intermedios	38
4.3 Puente térmico con soluciones constructivas mejoradas	40
4.3.1 Fachadas con hoja exterior de ladrillo caravista.....	41
4.3.2 Fachadas con acabado exterior monocapa.....	44
4.4 Determinación de la transmitancia térmica lineal	44
4.5 Simulación energética	50
Capítulo 5. Materiales y métodos. Mejoras de la hermeticidad al aire de la envolvente térmica de los edificios	54
5.1 Equipo de ensayos	54
5.2 Problemas de hermeticidad en los edificios de viviendas de nueva construcción	59
5.3 Mejoras propuestas	60
5.4 Comparación entre práctica habitual y mejoras propuestas. Resumen	63
5.5 Modelo del edificio para simulación energética	64
Capítulo 6. Resultados. Mejora de puentes térmicos lineales de frentes de forjado.....	66
6.1 Resultados de transmitancia térmica lineal	66
6.1.1 Fachadas con hoja exterior caravista.....	66
6.1.2 Fachadas con acabado exterior monocapa.....	74
6.2 Comparación con valores oficiales o de referencia	77
6.3 Resultados de impacto en los indicadores de los edificios NZEB	78
6.3.1 Fachadas con hoja exterior caravista.....	79
6.3.2 Fachadas con acabado exterior monocapa.....	83
Capítulo 7. Resultados. Mejora de la hermeticidad al aire de la envolvente térmica de los edificios...86	86
7.1 Resultados de la tasa de renovación de aire o n50.....	86
7.2 Resultados de impacto en los indicadores de los edificios NZEB	90
Capítulo 8. Conclusiones	96
8.1 Conclusiones del estudio sobre mejora de puentes térmicos	96
8.2 Conclusiones del estudio sobre mejora de la hermeticidad al aire.....	100
8.3 Futuras líneas de investigación	101
Referencias.....	104
Anexo: separata de los artículos.....	110
A. Analysis of design improvements for thermal bridges formed by double-brick façade and intermediate slabs for nZEB buildings in Spain.	110

Listado de figuras

Figura 1.1: Estrategias para lograr edificios de vivienda NZEB.....	12
Figura 2.1: Distribución del flujo de calor unidimensional y bidimensional en un puente térmico de frente de forjado.....	17
Figura 2.2: Imagen real (izquierda) y termográfica (derecha) que identifica los puentes térmicos puntuales generados por las fijaciones mecánicas del aislamiento térmico en un sistema ETICS.	17
Figura 2.3: Detalle del sistema típico constructivo de fachadas en España y el sur de Europa. Fachada de doble hoja cerámica con aislamiento térmico intermedio.	19
Figura 2.4: Puntos o zonas que generan infiltraciones y exfiltraciones.	22
Figura 3.1: Detalle encuentro de fachadas doble hoja con tres tipos de forjado.	29
Figura 3.2: Esquema de la instalación experimental para realizar los ensayos Blower Door.	31
Figura 4.1: Esquema de identificación de los tipos de puentes térmicos lineales.	36
Figura 4.2: Variación de la longitud de los puentes térmicos lineales en función del número de plantas de un edificio típico de viviendas español.	37
Figura 4.3: Estudio termográfico realizado sobre una fachada caravista de doble hoja cerámica.....	38
Figura 4.4: Mejora M1 considerada para reducir el puente térmico de frente de forjado con fachadas caravista. Detalle para el caso de forjados reticulares. Izquierda: esquema de la Mejora M1. Derecha: detalle del perfil de acero inoxidable.	42
Figura 4.5: Mejora M2 considerada para reducir el puente térmico de frentes de forjado con fachadas caravista.....	42
Figura 4.6: Mejora M3 considerada para reducir el puente térmico de frentes de forjado con fachadas caravista. Izquierda: esquema de la mejora M3. Derecha: detalle del bloque de vidrio celular.	43
Figura 4.7: Mejora M4 considerada para reducir el puente térmico de frentes de forjado con fachadas con acabado exterior monocapa.	44
Figura 4.8: Diagrama de flujo empleado para la evaluación del puente térmico de frente de forjado con fachadas de doble hoja cerámica y sus posibles mejoras.....	45
Figura 4.9: Imágenes del proceso de cálculo con THERM.....	47
Figura 4.10: Izquierda modelo con forjado como capa continua. Derecha diferenciando materiales.	49
Figura 4.11: Modelo desarrollado en CYPETherm HE Plus y edificio real.	50
Figura 4.12: Comparativa entre tipos de puentes térmicos en función de su contribución a la componente bidimensional del flujo de calor según Eq. (1) en el caso base del edificio en estudio.	52
Figura 5.1: Equipo instalado en una vivienda analizada durante la realización de un ensayo.....	54
Figura 5.2: Resultado del software TECTITE Express durante uno de los ensayos realizados.....	56
Figura 5.3: Localización de defectos de hermeticidad mediante anemómetro utilizado para localizar entradas o salidas de aire en las cajas de persiana e instalaciones.	57
Figura 5.4: Localización de defectos de hermeticidad en ventanas mediante generador de humo.	58
Figura 5.5: Localización de defectos de hermeticidad en ventanas mediante el empleo de la termografía. ..	58
Figura 5.6: Práctica habitual. Relleno del perímetro de ventanas con espuma de poliuretano generando pequeños orificios que generan infiltraciones de aire.....	59
Figura 5.7: Práctica habitual. Diferentes ejemplos de orificios y agujeros dejados en los puntos de paso de instalaciones.	60

Figura 5.8: Tratamiento previo propuesto para el paso de instalaciones. Superior práctica habitual. Inferior mejora propuesta con pasamuros de PVC y sellado posterior.	61
Figura 5.9: M1 Mejora básica. Sellado del paso de instalaciones. Superior sellado con enlucido de yeso. Inferior sellado con espuma de poliuretano.	62
Figura 5.10: M2 Mejora avanzada. Colocación de cinta precomprimida y membrana líquida de hermeticidad aplicada en el marco.	62
Figura 5.11: M2 Mejora avanzada. Láminas de sellado (superior) o membrana líquida en las zonas de paso de instalaciones (inferior).	63
Figura 6.1: Caso base fachadas caravista. Variación de la transmitancia térmica lineal interior y exterior.	67
Figura 6.2: Comparación de las zonas con la misma magnitud del flujo de calor para los tres forjados analizados con el mismo valor U de fachada.	68
Figura 6.3: Caso Mejora M1. Variación de la transmitancia térmica lineal interior y exterior.	69
Figura 6.4: Zonas con la misma magnitud de flujo de calor. Detalle del perfil de acero inoxidable para el caso M1 FR 15 (izquierda: modelo con materiales. Derecha: modelo con zonas con mismo flujo de calor).	70
Figura 6.5: Caso Mejora M2. Variación de la transmitancia térmica lineal interior y exterior.	72
Figura 6.6: Caso Mejora M3. Variación de la transmitancia térmica lineal interior y exterior.	73
Figura 6.7: Esquema de los casos considerados para analizar el efecto del aislamiento térmico bajo el pavimento.	74
Figura 6.8: Caso Base fachadas monocapa. Variación de la transmitancia térmica lineal interior y exterior.	75
Figura 6.9: Detalle de los casos FUE25, FUE20 y FUE15 donde se aprecia la conexión entre el aislamiento térmico de la fachada y el aligeramiento de EPS (remarcada en azul).	75
Figura 6.10: Caso Mejora M4. Variación de la transmitancia térmica lineal interior y exterior.	76
Figura 6.11: Evolución de los indicadores NZEB para Alicante (zona climática B4).	79
Figura 6.12: Evolución de los indicadores NZEB para Barcelona (zona climática C2).	80
Figura 6.13: Evolución de los indicadores NZEB para Madrid (zona climática D3).	81
Figura 6.14: Comparativa entre mejoras. Sobrecoste necesario para ahorrar una tonelada de CO2 al año.	82
Figura 6.15: Evolución de los indicadores NZEB para Alicante (zona climática B4).	83
Figura 6.16: Evolución de los indicadores NZEB para Barcelona (zona climática C2).	84
Figura 6.17: Evolución de los indicadores NZEB para Madrid (zona climática D3).	84
Figura 7.1: Histogramas con valores n50 obtenidos mediante ensayo Blower Door (práctica habitual).	87
Figura 7.2: Pequeños huecos en el perímetro de una ventana al aplicar «M1 - Mejora básica».	89
Figura 7.3: Izquierda conducto de cableado al aplicar la «M1 - Mejora básica». Derecha conducto de cableado al aplicar «M2 - Mejora avanzada».	89
Figura 7.4: Evolución de los indicadores NZEB para Alicante (Zona climática B4).	90
Figura 7.5: Evolución de los indicadores NZEB para Barcelona (Zona climática C2).	91
Figura 7.6: Evolución de los indicadores NZEB para Madrid (Zona climática D3).	92
Figura 7.7: Comparativa entre mejoras. Sobrecoste necesario para reducir una tonelada de CO2 al año.	93
Figura 8.1: Distribución de temperaturas para el caso base y las mejoras M1, M2 y M3.	97
Figura 8.2: Distribución de temperaturas para el caso base y la mejora M4.	99

Listado de tablas

Tabla 1. Valores máximos permitidos de transmitancia térmica lineal de puentes térmicos, $W/(m \cdot K)$	21
Tabla 2. Valores máximos (límite) de la estanqueidad al aire según DB-HE 2019 [21].....	23
Tabla 3. Valores de transmitancia térmica U de la fachada, espesores de aislamiento térmico y tipos de forjado considerados.....	39
Tabla 4. Propiedades consideradas para los materiales	40
Tabla 5. Condiciones de contorno consideradas para ser utilizadas en THERM	48
Tabla 6. Distribución por plantas del edificio en estudio	51
Tabla 7. Valores U de transmitancia térmica de referencia para las ciudades estudiadas	51
Tabla 8. Valores de la transmitancia térmica lineal interior Ψ_i consideradas para los diferentes puentes térmicos	51
Tabla 9. Características de las viviendas analizadas.....	57
Tabla 10. Comparación entre práctica habitual y diferentes técnicas de mejora de la hermeticidad al aire ...	63
Tabla 11. Fachadas caravista. Caso base. Resultados del análisis del flujo de calor	67
Tabla 12. Fachadas caravista. Caso Mejora M1. Resultados del análisis del flujo de calor.....	69
Tabla 13. Dependencia del flujo de calor con el espesor del aislamiento térmico en el frente de forjado para el caso M1 FR15.....	71
Tabla 14. Fachadas caravista. Caso Mejora M2. Resultados del análisis del flujo de calor.....	71
Tabla 15. Fachadas caravista. Caso Mejora M3. Resultados del análisis del flujo de calor.....	72
Tabla 16. Influencia del ancho del aislamiento térmico bajo el pavimento sobre el caso M3 FR 15	73
Tabla 17. Fachadas monocapa. Caso base. Resultados del análisis del flujo de calor	74
Tabla 18. Fachadas monocapa. Caso Mejora M4. Resultados del análisis del flujo de calor	76
Tabla 19. Valores de Ψ_i de las dos referencias oficiales empleadas.....	77
Tabla 20. Valores de la transmitancia térmica lineal interior Ψ_i consideradas para el puente térmico de frentes de forjado con fachadas caravista	78
Tabla 21. Valores de la transmitancia térmica lineal interior Ψ_i consideradas para el puente térmico de frentes de forjado con fachadas con terminación exterior de mortero monocapa	78
Tabla 22. Comparación entre el caso base y la mejora «M1 - Mejora básica»	88
Tabla 23. Comparación entre el caso base y la mejora «M2 - Mejora avanzada»	88
Tabla 24. Valores previstos de n50 al aplicar las dos mejoras propuestas sobre el valor medio de todos los ensayos realizados con el caso base, práctica habitual y valor máximo permitido por el estándar Passive House.....	88

Listado de abreviaturas, símbolos y letras griegas

Abreviaturas.-

<i>ACH</i>	Air Change per Hour
<i>ACS</i>	Agua Caliente Sanitaria
<i>CTE</i>	Código Técnico de la Edificación
<i>DB-HE</i>	Documento Básico de Ahorro de Energía
<i>EPS</i>	Expanded Polystyrene. Poliestireno Expandido
<i>EECN</i>	Edificios de Consumo Casi Nulo
<i>EPBD</i>	Energy Performance of Building Directive. Directiva de Eficiencia Energética de Edificios
<i>ETICS</i>	External Thermal Insulation Composite Systems. Sistema de Aislamiento Térmico por el Exterior
<i>HVAC</i>	Heating Ventilation and Air Conditioning. Calefacción, ventilación y aire acondicionado.
<i>NZEB</i>	Nearly Zero-Energy Building
<i>ZEB</i>	Zero Emission Building

Símbolos

A_i	Superficie del componente i de la envolvente térmica del edificio	m^2
C	Numero de materiales que forman una fachada	
c	Compacidad. Relación entre el volumen encerrado por la envolvente térmica del edificio y la suma de superficies de intercambio térmico con el aire exterior	m^3/m^2
C_{inf}	Caudal de fuga de aire a una presión de 1 Pa	m^3/h
$f_{R_{si,min}}$	Factor de temperatura superficial interior mínimo	
h_{si}	Coefficiente de película superficial interior	$W/(m^2 \cdot K)$
h_{se}	Coefficiente de película superficial exterior	$W/(m^2 \cdot K)$
L_j	Longitud dentro del modelo geométrico bidimensional sobre la que se aplica el valor U_j	m
L_p	Longitud del puente térmico p de la envolvente térmica del edificio	m
L^{2D}	Coefficiente de acoplamiento térmico para el cálculo bidimensional	$W/m \cdot K$
N	Número de componentes con flujo de calor unidimensional	
n_{50}	Tasa de renovación de aire en la diferencia de presión de 50 Pa	h^{-1}
q_{50}	Tasa de fuga de aire para la presión de 50 Pa	m^3/h
q_v	Caudal de fuga de aire a una presión de 50 Pa	m^3/h
R_a	Resistencia térmica del aislante térmico de la fachada	$(m^2 \cdot K)/W$
R_{si}	Resistencia térmica superficial interior	$(m^2 \cdot K)/W$
R_{se}	Resistencia térmica superficial exterior	$(m^2 \cdot K)/W$
t	Espesor de cada material que forma una fachada	m
U	Transmitancia térmica de la fachada	$W/(m^2 \cdot K)$
U_j	Transmitancia térmica del componente j que separa dos ambientes considerados	$W/(m^2 \cdot K)$
U_i	Transmitancia térmica del componente i de la envolvente térmica del edificio	$W/(m^2 \cdot K)$
R_a	Resistencia térmica del aislante térmico de la fachada	$(m^2 \cdot K)/W$
V	Volumen libre interior del edificio ensayado	m^3

Letras griegas

ϕ_l	Flujo de calor por metro lineal del puente térmico	W/m
ϕ_T	Flujo de calor por conducción	W
θ_i	Temperatura interior	°C
θ_e	Temperatura exterior	°C
θ_{si}	Temperatura superficial interior	°C
λ	Conductividad térmica de un material	W/(m·K)
χ	Transmitancia térmica de un puente térmico puntual	W/K
Ψ	Transmitancia térmica lineal del puente térmico que separa dos ambientes considerados	W/(m·K)
Ψ_e	Transmitancia térmica lineal medida con el sistema de dimensiones exteriores	W/(m·K)
Ψ_i	Transmitancia térmica lineal medida con el sistema de dimensiones interiores	W/(m·K)
Ψ_p	Transmitancia térmica lineal del puente térmico p de la envolvente térmica del edificio	W/(m·K)



CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN



Capítulo 1. Introducción

1.1 Motivación

El cambio climático es uno de los grandes problemas de la sociedad actual y tratar de paliar sus consecuencias es uno de los principales retos a los que nos enfrentamos. Para conseguirlo, nuestros esfuerzos se deberían centrar en reducir lo máximo posible el consumo de energía asociado a la actividad humana, apostando además por el uso de fuentes de energías renovables frente al uso de combustibles fósiles.

Según datos de la Comisión Europea [1] los edificios son responsables del 41% del consumo de energía de la Unión Europea, por encima del transporte y la industria. En España, el consumo de energía de los edificios representa el 31,9% del total, de los cuales el 18,3% corresponde a los edificios con uso residencial vivienda y el 13,6% restante a los edificios del sector terciario. Asimismo, el elevado consumo de los edificios está relacionado principalmente con el servicio de calefacción (47% del consumo de energía en viviendas).

Mediante la Directiva Europea 2010/31/UE [2] y [3] se establece en la Unión Europea que, los nuevos edificios, construidos a partir del 1 de enero de 2021, sean «Edificios de Consumo de Energía Casi Nulo EECN o Nearly Zero-Energy Building - NZEB». Según la definición de la Directiva [2], un edificio NZEB es un «edificio con un nivel de eficiencia energética muy alto en el que, la cantidad casi nula o muy baja de energía requerida, debería estar cubierta, en muy amplia medida, por energía procedente de fuentes renovables, incluida energía procedente de fuentes renovables producida in situ o en el entorno».

La Directiva Europea 2018/844 [4] modifica algunos artículos de la Directiva 2010/31/UE e incide en la transformación de todos los edificios en NZEB, tanto nuevos como existentes, siempre que sea viable técnica y económicamente, buscando lograr un parque inmobiliario descarbonizado y altamente eficiente, desde un punto de vista energético, en el año 2050.

En diciembre de 2021 la Comisión Europea propuso revisar la Directiva [2] y dar pasos para que los edificios NZEB avancen hacia los «edificios de emisiones cero o Zero Emission Building - ZEB». Los edificios ZEB son aquellos con un nivel de eficiencia energética muy alto en el que, la cantidad muy baja de energía requerida estará completamente cubierta por energías renovables y sin emisiones de CO₂ in situ procedentes de combustibles fósiles. Los requisitos de los edificios ZEB se aplicarán a partir del 1 de enero de 2030 para todos los edificios nuevos y a partir del 1 de enero de 2027 para los edificios nuevos ocupados o propiedad de la autoridad pública.

La norma EN ISO 52000-1 [5] en su Anexo H ofrece la siguiente propuesta de cuatro indicadores para la evaluación de dichos edificios:

- Primer indicador o requisito. Está relacionado con las demandas energéticas de calefacción y de refrigeración. Se consideran aspectos como la calidad de la envolvente térmica (aislamiento térmicos, ventanas, puentes térmicos, etc.), el diseño bioclimático,

la inercia térmica, la zonificación las condiciones meteorológicas y la necesidad de garantizar las condiciones de confort en el interior de los edificios.

- Segundo indicador o requisito. Consumo de energía primaria total. Refleja la eficiencia de los sistemas técnicos del edificio (instalación HVAC, suministro de agua caliente sanitaria ACS e iluminación)
- Tercer indicador o requisito. Consumo de energía primaria no renovable sin compensación entre vectores energéticos. Refleja la contribución de las energías procedentes de fuentes renovables y no considera la compensación entre diferentes vectores energéticos, por ejemplo, el efecto de la energía exportada.
- Cuarto indicador o requisito. Consumo de energía primaria no renovable con compensación entre vectores energéticos y el efecto de la energía exportada.

La Fig. 1.1 muestra las posibles estrategias a llevar a cabo para lograr edificios NZEB que se pueden agrupar en ocho apartados:

1. Alto nivel de aislamiento térmico (fachadas, cubiertas, suelos y particiones interiores con espacios no habitables o espacios no acondicionados).
2. Marcos y acristalamientos altamente aislantes térmicos (ventanas, puertas exteriores y lucernarios). Incidiendo también en el acoplamiento entre el marco y el acristalamiento y el tipo de intercalario o separador empleado en el acristalamiento.
3. Control solar mediante protecciones de huecos (ventanas, puertas exteriores y lucernarios) y el color exterior de marcos y partes opacas (absortividad).
4. Ventilación mecánica, que para mayor eficiencia puede incorporar recuperador de calor y, según la zona climática, recuperador entálpico.
5. Eliminación de los puentes térmicos formados en los diferentes encuentros entre los elementos de la envolvente térmica del edificio (frentes de forjado, cubiertas, suelos, contorno de huecos, pilares, etc.).
6. Estanqueidad al aire de la envolvente térmica para minimizar la entrada de aire por infiltraciones y el consiguiente incremento en el consumo energético.
7. Instalaciones térmicas (agua caliente sanitaria, calefacción y refrigeración) con alta eficiencia energética.
8. Empleo de energías renovables, tanto para producción de agua caliente como para generación de electricidad.

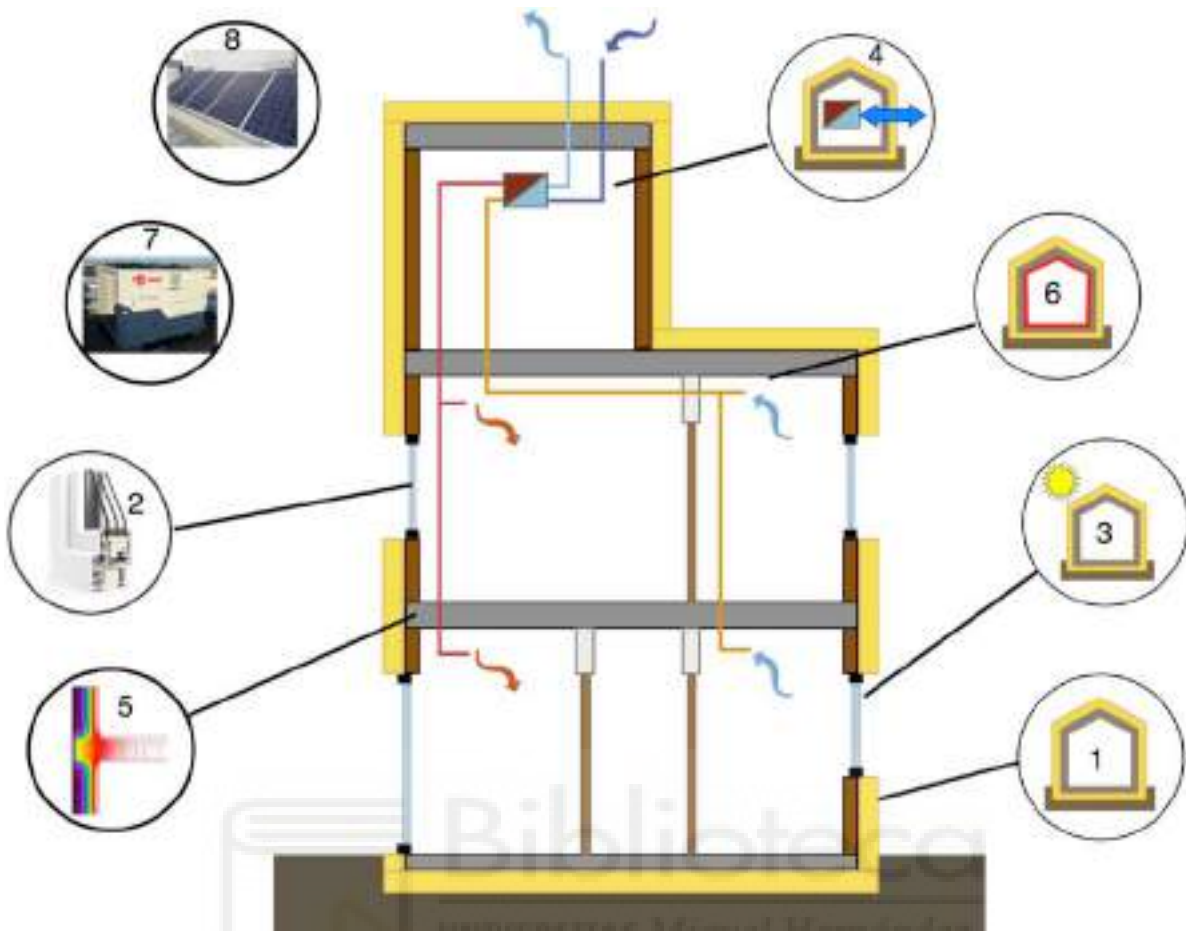


Figura 1.1: Estrategias para lograr edificios de vivienda NZEB.

Muchas de estas estrategias se basan en la aplicación de tecnologías ya desarrolladas y probadas suficientemente por la industria de la construcción. Por ello, para los edificios de viviendas, los puntos débiles son:

- El tratamiento adecuado de los puentes térmicos, buscando adaptar las soluciones constructivas tradicionales, para eliminarlos o reducirlos y que ello no suponga un incremento significativo de los costes de construcción.
- El sellado de la envolvente térmica de los edificios para mejorar su estanqueidad y limitar las infiltraciones de aire, mejorando la hermeticidad y evitando la entrada descontrolada de aire exterior.

En la bibliografía se pueden encontrar multitud de estudios que analizan los puentes térmicos y la hermeticidad al aire de los edificios (infiltraciones). En el **capítulo 2 Estado del arte** de esta tesis se incluye una revisión bibliográfica detallada en este campo.

Sin embargo, los trabajos existentes se centran en analizar los problemas (puentes térmicos o infiltraciones) pero no aportan el diseño de posibles mejoras constructivas ni el análisis de su impacto, en términos de mejora de la eficiencia energética de los edificios, en los indicadores de los edificios NZEB.

1.2 Antecedentes

En Europa, para reducir el consumo de energía en los edificios, los diferentes Estados Miembros elaboran normas de obligado cumplimiento aplicables a los edificios de nueva construcción y también en la rehabilitación de edificios existentes.

En el caso de España, la normativa de ahorro energético ha ido incrementando las exigencias y los indicadores a medir, centrándose en tres aspectos:

- La reducción de la **demanda de energía** de calefacción y de refrigeración. Para ello es clave realizar un tratamiento adecuado de la envolvente térmica de los edificios buscando:
 - Para controlar la demanda de refrigeración reducir las ganancias solares a través de los huecos empleando para ello protecciones solares (control solar).
 - Para controlar la demanda de calefacción reducir las pérdidas energéticas con cuatro estrategias: (i) aislamiento térmico; (ii) marcos y acristalamientos; (iii) puentes térmicos y (iv) hermeticidad al aire (infiltraciones).
- El aumento de la **eficiencia energética** de los sistemas térmicos (ACS y HVAC) y de iluminación (en el caso de uso terciario).
- El aporte de **energías renovables** para satisfacer la demanda de ACS y la generación de energía eléctrica.

Como se ha indicado en el apartado 1.1, la mayoría de estrategias están solucionadas con tecnologías ya desarrolladas y probadas suficientemente por la industria de la construcción siendo los puntos débiles los puentes térmicos y la hermeticidad al aire (infiltraciones).

Por ello, **este trabajo de investigación se centra:**

- en primer lugar, en **proponer mejoras constructivas** de los puentes térmicos y de la hermeticidad al aire de los edificios (infiltraciones);
- en segundo lugar, en **analizar el impacto** de dichas mejoras en los indicadores anuales de los edificios NZEB y en la reducción de las emisiones de CO₂;
- y, en tercer y último lugar, en **analizar el sobrecoste de construcción** de las mejoras por tonelada de CO₂ ahorrada al año.

La investigación ha sido posible gracias a la colaboración tanto de miembros del Área de Máquinas y Motores Térmicos de la Universidad Miguel Hernández de Elche como de información y experiencia aportada por la empresa ETRES Consultoría y Edificación SL - ETRES Consultores de la cual, el autor de esta Tesis, es socio fundador. Gracias a ello se ha podido analizar los sistemas constructivos tradicionales y, con ello, cuáles son los puentes térmicos generados y cuáles son los problemas habituales de hermeticidad al aire en los edificios y dónde están los problemas que generan infiltraciones de aire.



CAPÍTULO 2

ESTADO DEL ARTE

Capítulo 2. Estado del arte

Dentro de las estrategias para mejorar la calidad de la envolvente térmica de los edificios y, con ello, reducir las demandas energéticas de calefacción y refrigeración, hay dos que se encuentran poco desarrolladas en el sector de la edificación en España.

Esas dos estrategias son por un lado, el análisis y tratamiento adecuado de los puentes térmicos y, por otro lado, el sellado adecuado de todos aquellos puntos y elementos que atraviesan la envolvente de los edificios y pueden generar infiltraciones de aire.

En este capítulo se incluye toda la revisión bibliográfica que se ha realizado para analizar tanto la estrategia de mejora de los puentes térmicos como la estrategia para la de la mejora de la hermeticidad al aire (infiltraciones).

En la parte de los puentes térmicos, la bibliografía está incluida dentro del artículo [6] publicado y realizado en el marco de los trabajos de esta investigación.

2.1 Estrategia de mejora de puentes térmicos

La norma [7] define puente térmico como aquellas zonas de la envolvente térmica de un edificio donde la resistencia térmica, normalmente uniforme, cambia significativamente debido a: (i) penetraciones de otros elementos constructivos del edificio o de materiales con diferente conductividad térmica; (ii) un cambio en el espesor de la fachada; (iii) diferencia entre las dimensiones internas y externas, por ejemplo, esquinas de fachadas.

Conforme a lo anterior, en los edificios se generan dos tipos de puentes térmicos:

- **Lineales.**- aquellos formados por el encuentro de las fachadas con un elemento del edificio en el cual una de sus tres dimensiones es significativamente mayor que las otras dos. Por ejemplo, el encuentro con un pilar (la altura del pilar es significativamente mayor que las dos caras de su sección) o el encuentro con un frente de forjado (el perímetro del frente de forjado es mucho mayor que su sección), etc. El flujo de calor en estos tipos de puentes térmicos es bidimensional.
- **Puntuales.**- aquellos que se producen por la aparición de elementos no continuos, como por ejemplo, las fijaciones puntuales del aislamiento térmico en una fachada o los pernos de anclaje en un frente de forjado para el apoyo de una fachada caravista. También se producen en el vértice común que aparece en el encuentro de dos fachadas (esquina) con una cubierta o un suelo. El flujo de calor en estos tipos de puentes térmicos es tridimensional.

La Fig. 2.1 muestra la distribución del flujo unidimensional y el bidimensional en un puente térmico lineal de frente de forjado (encuentro de fachadas con forjados intermedios).

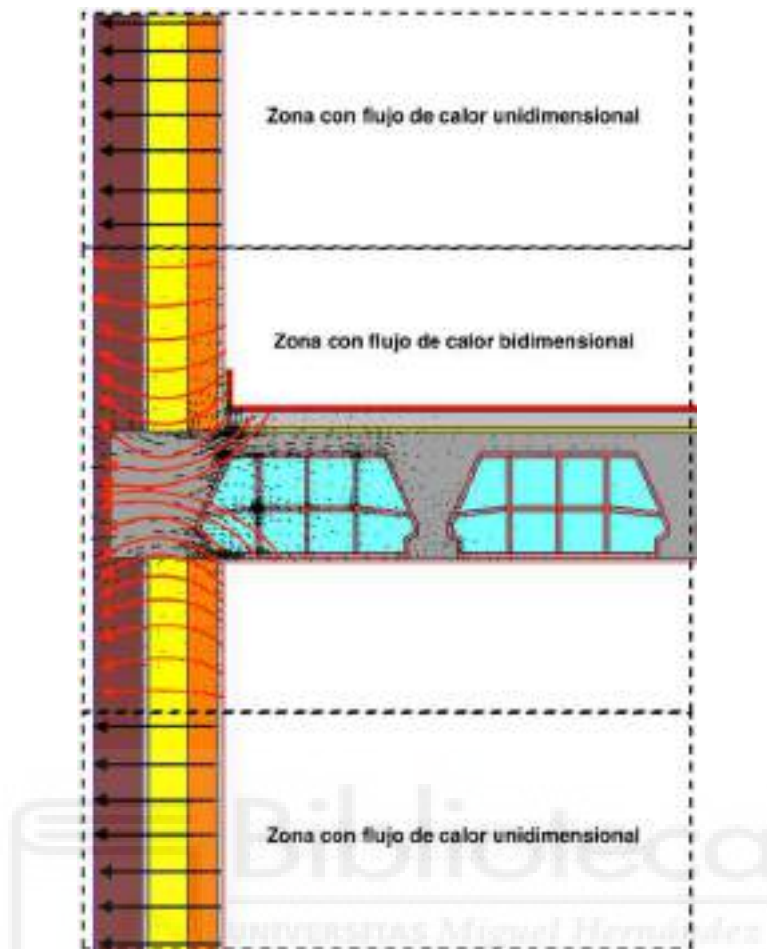


Figura 2.1: Distribución del flujo de calor unidimensional y bidimensional en un puente térmico de frente de forjado.

La Fig. 2.2 muestra una imagen termográfica realizada en un edificio de viviendas situado en Alicante en septiembre de 2020 a las 10:30 de la mañana. Está tomada por la cara exterior de la fachada con sistema ETICS. En ella se aprecian los puentes térmicos puntuales generados por las rosetas plásticas de fijación del aislamiento térmico al soporte resistente.

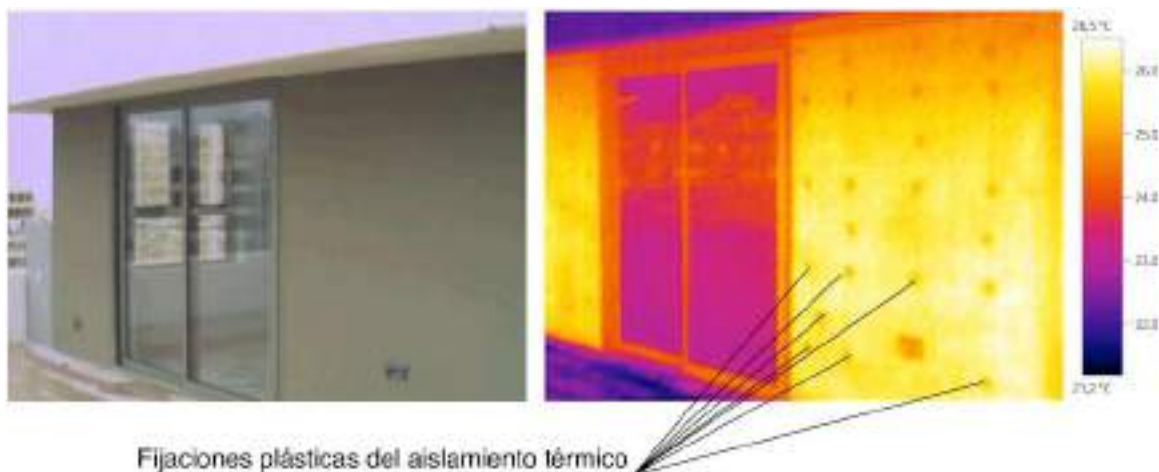


Figura 2.2: Imagen real (izquierda) y termográfica (derecha) que identifica los puentes térmicos puntuales generados por las fijaciones mecánicas del aislamiento térmico en un sistema ETICS.

Los puentes térmicos generan dos efectos en el comportamiento de los edificios:

- a) Incremento de las pérdidas energéticas sobre todo en régimen de calefacción. En este sentido, los puentes térmicos se caracterizan mediante el valor de transmitancia térmica, Ψ para puentes térmicos lineales y χ para los puntuales.
- b) Formación de patologías relacionadas con la aparición de condensaciones superficiales, la generación de moho y los posibles efectos negativos sobre la salud de los ocupantes de los edificios. Todo ello relacionado con la disminución de la temperatura superficial interior en la zona del puente térmico. En este caso, el puente térmico se caracteriza mediante el factor de temperatura superficial interior o f_{rsi} .

La definición de la transmitancia térmica lineal Ψ está descrita en la norma [7]. En función de la dimensión del puente térmico utilizada (interior o exterior), se obtendrá un valor distinto de la transmitancia térmica lineal Ψ , dando lugar a la transmitancia térmica lineal interior Ψ_i o exterior Ψ_e .

El flujo de calor y la transmitancia térmica lineal de un puente térmico puede determinarse mediante dos métodos: (i) métodos detallados, usando un software específico de cálculo aplicando la norma EN ISO 10211 [7]; (ii) métodos simplificados, usando catálogos de puentes térmicos o los valores indicados en la norma EN ISO 14683 [8]. También se puede emplear el método del muro equivalente para puentes térmicos propuestos en los estudios [9] y [10].

La norma [7] indica los puentes térmicos (puntuales y lineales) que se generan en diversos puntos de la envolvente térmica de los edificios y han sido analizados por diversas investigaciones que han demostrado su importancia en el análisis del comportamiento energético de los edificios.

A. Capozzoli et. al. [11] realizaron un análisis de treinta y seis tipos de puentes térmicos lineales que se producen en la envolvente térmica de los edificios. Desde un punto de vista del diseño de los edificios, el estudio incide en que, para cumplir con las exigencias de la Directiva de Eficiencia Energética en Edificios o EPBD [2], los diseñadores deben prestar atención al diseño de los edificios y en concreto a los puentes térmicos ya que no actuar sobre ellos sólo reducirá el flujo de calor unidimensional y no afectará al bidimensional que se produce en los puentes térmicos.

La Fig. 2.3 muestra un detalle del sistema típico constructivo de fachadas en España y en muchos países del sur de Europa. En el caso de esta imagen, la fachada está formada por una hoja exterior de fábrica de ladrillo hueco triple de medio pie (11,5 cm de espesor), aislamiento térmico de lana mineral de 10 cm de espesor y una hoja interior de ladrillo hueco doble de 7 cm de espesor. La imagen muestra la fachada antes de aplicar los revestimientos interiores (enlucido de yeso) y exteriores (mortero de cemento).



Figura 2.3: Detalle del sistema típico constructivo de fachadas en España y el sur de Europa. Fachada de doble hoja cerámica con aislamiento térmico intermedio.

El estudio realizado por T. G. Theodosiou et. al. [12] sobre un edificio de viviendas en Grecia con construcción típica de fachada de doble hoja cerámica, concluye que este tipo de fachadas es susceptible de generar un gran número de puentes térmicos. Indica que la inclusión o no del efecto de los puentes térmicos en la fase de diseño del edificio afecta a su eficiencia energética, ya que las necesidades de calefacción se pueden ver incrementadas en un 30% respecto a las determinadas en el cálculo sin considerar los puentes térmicos. También indica que incluir o no los puentes térmicos en la fase de diseño del edificio tiene poca influencia en la demanda de refrigeración.

V. Corrado et. al. [13] lleva a cabo una investigación sobre una vivienda unifamiliar con tres casos diferentes de aislamiento térmico de la parte opaca de la envolvente térmica: moderada (valor U medio de $0,30 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$); bien aislada (valor U medio de $0,25 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$); y altamente aislada (valor U medio de $0,15 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$). Además compara dos tipos de fachada: External Thermal Insulation Composite Systems ETICS y doble hoja cerámica con aislamiento térmico intermedio. Concluye que, para el caso de doble hoja cerámica, la influencia de los puentes térmicos en las necesidades de calefacción varía entre un 30% y un 67% en función de la zona climática (Milán y Roma) y del valor U promedio considerado.

G. Evola et. al. [14] evalúa el impacto energético de los puentes térmicos y su viabilidad económica de corrección en edificios situados en el Mediterráneo. Para ello, analiza dos tipos de edificios: viviendas adosadas y viviendas pareadas. Esta investigación muestra que el tratamiento correcto de los puentes térmicos es una forma efectiva para reducir la demanda de energía primaria de calefacción pero tiene un impacto pequeño en la de refrigeración.

El estudio realizado por H. Ge et. al. [15] sobre un edificio de viviendas situado en Canadá, ofrece una comparación entre siete tipos de puentes térmicos lineales con dos niveles de diseño: uno denominado como «pobre» en el que no hay tratamiento del puente térmico lineal y otro denominado como «mejorado» en el que sí hay un tratamiento correcto del puente térmico lineal. Cubre cuatro ciudades de Canadá y demuestra que la mejora de los puentes térmicos reduce la demanda energética de calefacción entre 3,7% y 5,5%.

El estudio llevado a cabo por C. Misiópecki et. al. [16] indica que envolventes térmicas (muros de fachada, suelos, cubiertas, etc.) con alto valor de resistencia térmica, causan que el efecto de los puentes térmicos sea más pronunciado, debido a su mayor impacto en las pérdidas energéticas, siendo responsables del 36% del total de dichas pérdidas.

El documento publicado en el 11th Nordic Symposium on Building Physics [17] presenta una revisión de las exigencias respecto a los puentes térmicos, de las normativas de construcción de varios países europeos: Francia, Austria, Chipre, Grecia, España, Bélgica, Estonia, Rumania y Suecia. La mayoría de estos países utilizan valores tabulados de la transmitancia térmica lineal. El informe de ASIEPI (Assessment and Improvement of the EPBD Impact) [18] también presenta una revisión similar que ha sido actualizada por el informe [19].

El resumen de los tres informes anteriores es que sólo hay tres países en Europa (Francia, República Checa y Dinamarca) que tienen fijado un valor máximo de la transmitancia térmica lineal de los puentes térmicos. En el resto de países, en general, los puentes térmicos se consideran en los cálculos energéticos pero sin incluir un valor máximo permitido.

Passive House [20] es un estándar de construcción de edificios con muy bajo consumo, creado en la década de 1990 en Alemania, con los siguientes requisitos: (i) demanda energética de calefacción igual o inferior a 15 kWh/(m²·año); (ii) demanda energética de refrigeración igual o inferior a 15 kWh/(m²·año); (iii) consumo de energía primaria para calefacción, refrigeración, ventilación, ACS, electrodomésticos y auxiliar, igual o inferior a 120 kWh/(m²·año); (iv) hermeticidad al aire n_{50} igual o inferior a 0,64 h⁻¹.

Para ello Passive House [20] establece los siguientes criterios de diseño o principios básicos: (i) alto nivel de aislamiento térmico que, para climas cálidos templados se traduce en un valor máximo de transmitancia térmica U de 0,30 W/(m²·K); (ii) huecos (ventanas y puertas exteriores) con un alto nivel de aislamiento térmico que, para climas cálidos templados se traduce en un valor máximo de transmitancia térmica U_w de 1,00 W/(m²·K); (iii) ausencia de puentes térmicos, es decir, valor de transmitancia térmica lineal máxima Ψ_i de 0,01 W/m·K; (iv) sistema de ventilación con recuperador de calor con una eficiencia mínima del 75%.

La Tabla 1 facilita los valores máximos permitidos en los tres países indicados así como para el estándar Passive House [20].

Tabla 1. Valores máximos permitidos de transmitancia térmica lineal de puentes térmicos, $W/(m \cdot K)$

Francia	Encuentro de fachadas con forjados intermedios			0,60
Dinamarca	Contorno de cimentaciones de suelos que estén calefactados			0,40
	Encuentro de fachadas con el contorno de huecos (jambas, alfeizar, dintel)			0,06
	Encuentro de cubiertas con el contorno de huecos (lucernarios, etc.)			0,20
República Checa	Tipo de encuentro	Requerido	Recomendado	Recomendado para casas pasivas
	Encuentro de fachadas con cualquier otro elemento excepto huecos	0,20	0,10	0,05
	Encuentro de fachadas con huecos (jamba, alfeizar, dintel)	0,10	0,03	0,01
Estándar Passive House	El diseño del edificio debe considerarse como «libre de puentes térmicos». Para ello, el valor máximo de transmitancia térmica lineal interior debe ser inferior a			0,01

En España el documento Guía de aplicación DB HE 2019 [21] facilita una valoración del puente térmico lineal en función de su transmitancia térmica lineal interior y de su influencia en la demanda energética: correcto (influencia reducida en la demanda energética) de 0,01 a 0,20 $W/m \cdot K$; peligroso de 0,20 a 0,50 $W/m \cdot K$; deficiente mayor a 0,50 $W/m \cdot K$.

En España los edificios se construyen sin un tratamiento adecuado de los puentes térmicos, siendo habitual que la capa de aislamiento térmico de las fachadas no sea continua a lo largo de toda la envolvente térmica.

Además, es habitual también que los proyectos de construcción de nuevos edificios carezcan de un estudio pormenorizado del tratamiento de los puentes térmicos. Como ha quedado demostrado por las investigaciones indicadas anteriormente, esta situación provoca un incremento de las necesidades energéticas y dificulta alcanzar los requisitos de los edificios NZEB. Parece necesario, por tanto, plantear propuestas de mejora encaminadas a la reducción del efecto de los puentes térmicos en los edificios de obra nueva.

2.2 Estrategia de mejora de la hermeticidad al aire

Según [21] la permeabilidad al aire «es la propiedad de una superficie de dejar pasar el aire cuando se encuentra sometida a una diferencia de presiones entre sus caras».

La hermeticidad al aire de los edificios es la propiedad que cuantifica la permeabilidad de la envolvente de un edificio, utilizando el valor de infiltraciones (caudal de aire sin control que accede al interior del edificio) o de exfiltraciones (caudal de aire sin control que sale del interior del edificio al exterior).

Estas entradas o salidas de aire se generan por la acción del viento, por diferencias de temperatura interior - exterior (efecto convectivo) o por la acción de los sistemas mecánicos de climatización o ventilación que sobrepresionan el aire interior.

En resumen, un edificio muy hermético o con un valor de permeabilidad al aire muy bajo, tendrá un valor de infiltraciones y de exfiltraciones muy bajo. También se emplea el sinónimo «edificio estanco o estanqueidad al aire» para hacer referencia a la hermeticidad.

La envolvente de los edificios no es totalmente estanca al paso del aire. Esa falta de estanqueidad se debe a (i) la existencia de discontinuidades entre los diferentes materiales de construcción de los edificios (por ejemplo, la unión entre la hoja de ladrillo de una fachada y el forjado o la unión entre el premarco y el marco de una ventana con la hoja de ladrillo de la fachada) y (ii) la existencia de diferentes elementos que atraviesan los cerramientos exteriores del edificio (tuberías, cableados, etc.). La Fig. 2.4 muestra un esquema de esas zonas que influyen en la estanqueidad al aire de los edificios.

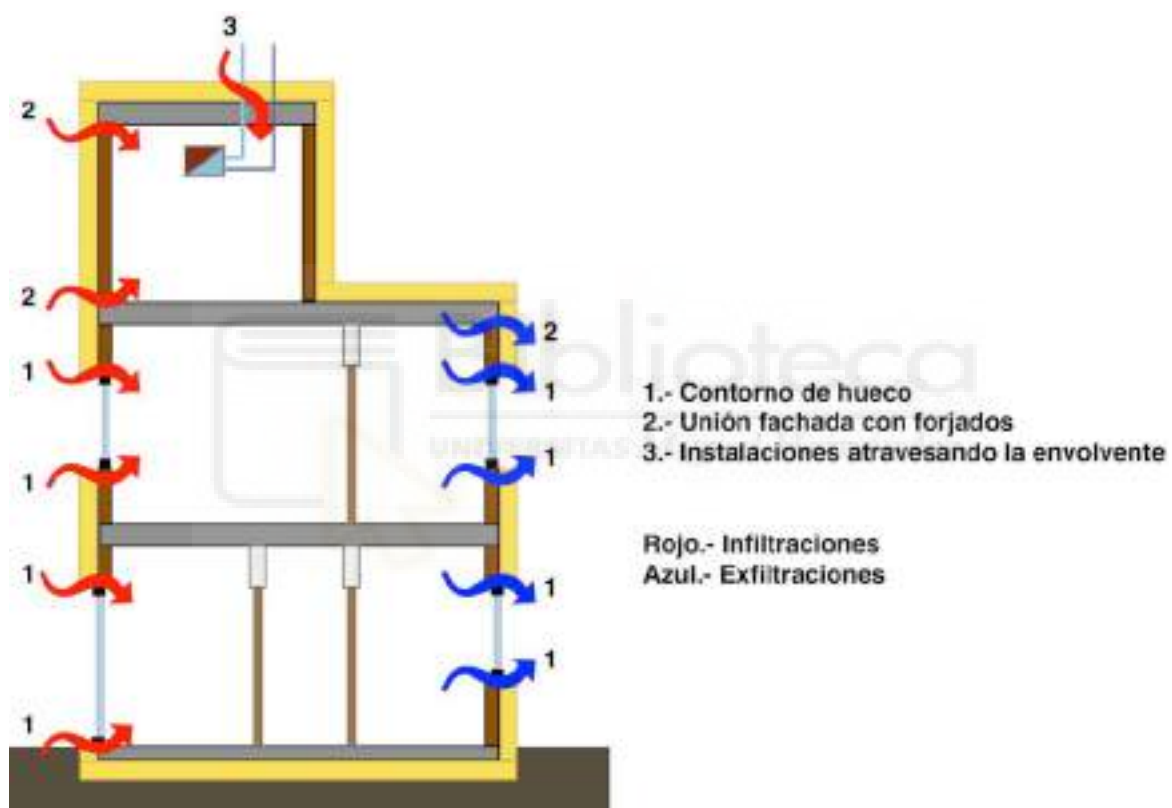


Figura 2.4: Puntos o zonas que generan infiltraciones y exfiltraciones.

Esta falta de estanqueidad al aire de los edificios genera los siguientes efectos en el comportamiento de los edificios:

- a) Incremento de las demandas energéticas de calefacción y de refrigeración. El aire exterior que entra en el edificio (infiltraciones) se encuentra a una temperatura diferente de la del interior lo que implicará el incremento de las necesidades energéticas para mantener la temperatura de confort interior. Por otro lado el aire que sale del edificio (exfiltraciones) representa directamente una pérdida energética.

- b) Disconfort de los ocupantes del edificio por la existencia de corrientes de aire que no están a la temperatura de confort y que además pueden transportar ruido y contaminantes atmosféricos.

En el periodo 2017 - 2021, el ritmo medio de construcción de nuevas viviendas en España se situó en 125.000 unidades al año [22]. Dichas viviendas se construyen sin ningún tratamiento específico en su hermeticidad al aire, es decir, históricamente nunca se ha actuado en las infiltraciones.

Las exigencias en España para los Edificios de Consumo de Energía casi Nulo - NZEB, obligatorias desde septiembre de 2020 [21], por primera vez establecen un valor límite para la estanqueidad al aire de los edificios de viviendas. La estanqueidad o permeabilidad al aire se determina para una presión diferencial de 50 Pa « n_{50} » y no debe superar los valores indicados en la Tabla 2.

Tabla 2. Valores máximos (límite) de la estanqueidad al aire según DB-HE 2019 [21]

Compacidad c m^3/m^2	Valor máximo (límite) de la estanqueidad al aire n_{50} h^{-1}
$c \leq 2$	6
$c \geq 4$	3
Notas.- Los valores límite para compacidades intermedias ($2 < c < 4$) se obtienen por interpolación.	

Conforme a [2] la eficiencia energética de un edificio se define como «la cantidad de energía calculada o medida que se necesita para satisfacer la demanda de energía asociada a un uso normal del edificio, que incluirá, entre otras cosas, la energía consumida en la calefacción, la refrigeración, la ventilación, el calentamiento de agua y la iluminación».

La hermeticidad al aire de los edificios ha sido analizada por diferentes investigaciones que han demostrado su influencia en la eficiencia energética de los edificios en varios países de Europa y Norte América.

Conforme a la norma EN ISO 9972 [23] la permeabilidad o hermeticidad al aire de los edificios se determina mediante el método de presurización o despresurización con un ventilador. Dicho método se conoce como ensayo Blower Door.

C.N. Bramiana et. al. [24] analiza una base de datos de ensayos Blower Door realizados en 300 viviendas en los Países Bajos para buscar la relación entre la hermeticidad al aire y las características del diseño del edificio o el proceso de construcción del edificio. Los resultados obtenidos demuestran que sólo el «año de construcción» y las «infiltraciones totales de aire» tienen relación con la hermeticidad al aire del edificio.

La Directiva 2010/31/UE [2] define el certificado de eficiencia energética como «certificado en el que se indica la eficiencia energética de un edificio o unidad de este». Mediante dicho certificado, los edificios se clasifican entre la Clase A a la Clase G, siendo la Clase A la más eficiente y la Clase G la menos eficiente.

J. Šadauskienė et. al. [25] lleva a cabo un análisis sobre un total de 27 viviendas unifamiliares construidas en el centro de Lituania entre 2007 y 2011, con el objetivo de determinar la influencia de la hermeticidad al aire del edificio en la certificación de eficiencia energética. La clase energética A tiene un valor n_{50} de $0,6 \text{ h}^{-1}$. Los puntos de fuga de aire típicos son: uniones de techos y suelos con muros exteriores; uniones de los muros de separación con muros exteriores y cubiertas; penetraciones de instalaciones eléctricas y de fontanería en la capa de hermeticidad; contorno de ventanas y puertas.

Jésica F. et. al. [26] desarrolla una investigación sobre 45 viviendas de siete edificios multifamiliares situados en el área Mediterránea del sur de España, obteniendo un valor medio de n_{50} de $5,72 \text{ h}^{-1}$ e indica que este valor es superior a lo indicado en las normas de eficiencia energética y recomendaciones para edificios europeos. Este estudio muestra que las zonas que contribuyen a incrementar las infiltraciones de aire en los edificios son: las instalaciones de fontanería, electricidad, los conductos de ventilación y las juntas que se producen entre las ventanas y la parte opaca de las fachadas.

Almeida et. al. [27] elabora un estudio para cuantificar la influencia de las ventanas en la hermeticidad de los edificios. Para ello, realiza 104 ensayos de presurización sobre 23 ventanas. Su principal conclusión es que la contribución de una ventana a la permeabilidad al aire de una habitación es del 15% y que la caja de persiana supone el 44%.

Atefeh Salehi et. al. [28] realiza un estudio sobre cuatro edificios de viviendas situados en Coimbra (Portugal) con el objetivo de analizar la estanqueidad al aire (hermeticidad) en edificios existentes mediante la realización de medidas in situ. La tasa de renovación de aire de las viviendas n_{50} varía entre $5,48$ y $9,63 \text{ h}^{-1}$. Detecta que las mayores infiltraciones se producen durante el ensayo de despresurización debido a la mala calidad de las ventanas y la construcción del edificio.

Goopyo Hong et. al. [29] lleva a cabo un estudio sobre tres apartamentos de un edificio recién construido situado en Corea del Sur. Desarrolla ensayos Blower Door (presurización y despresurización) y también ensayo de gas trazador. Los resultados obtenidos de n_{50} varían entre $0,7$ y $1,0 \text{ h}^{-1}$ cuando todos los elementos están sellados. Concluye que la mayor zona de infiltraciones de aire es la puerta de entrada.

En España se ha desarrollado recientemente varios estudios, todos ellos centrados en edificios existentes, construidos en su mayoría a mediados del siglo XX y con el objetivo de determinar la estanqueidad al aire (hermeticidad) de esos edificios sin aportar mejoras. Todos los edificios analizados son anteriores a la normativa que fija las exigencias para los edificios de Consumo de Energía casi Nulo NZEB en España [21].

El primero de ellos, elaborado por Jesús Feijó-Muñoz et. al. [30], se centra en el área continental de España analizando 129 ensayos Blower Door en diferentes tipologías de viviendas construidas entre 1880 y 2011. El resultado medio obtenido de n_{50} es $6,1 \text{ h}^{-1}$ para viviendas unifamiliares y $7,1 \text{ h}^{-1}$ para edificios plurifamiliares.

El segundo estudio, desarrollado por Jérica Fernández-Agüérola et. al. [31], se centra en el sur de España analizando 159 viviendas sociales existentes, construidas entre 1954 y 2011, obteniendo un valor medio de n_{50} de 7 h⁻¹.

El tercer estudio, llevado a cabo por Jesús Feijó-Muñoz et. al. [32], se centra en el área mediterránea de España y las Islas Canarias analizando 225 de ensayos Blower Door realizados sobre viviendas existentes construidas entre 1890 y 2015, obteniendo un valor medio de n_{50} de 8,43 h⁻¹.

Silvia Guillén-Lambea et. al. [33] efectúa un análisis sobre edificios de viviendas situados en varias ciudades europeas. El estudio pretende determinar el máximo valor aceptable de n_{50} para edificios residenciales NZEB en los países mediterráneos tomando como referencia el valor máximo permitido del Estándar Passive House [20], n_{50} igual a 0,64 h⁻¹. Concluye indicando que la demanda de calefacción se ve afectada por las infiltraciones mientras que la de refrigeración se ve muy poco afectada. Tomando como referencia el valor 0,64 h⁻¹, en las ciudades situadas en el Norte de Europa la demanda energética para climatización se ve incrementada en un 13% mientras para ciudades situadas en el área mediterránea, dicho incremento es del 4 al 7%. Finalmente, recomienda modificar el valor máximo permitido por el estándar Passive House [20] en función de la zona climática: localidades situadas en el Norte de Europa: 0,64 h⁻¹; para el área mediterránea: 1,0 h⁻¹ y para localidades situadas en el sur del área mediterránea: 2,0 h⁻¹.

A la vista de los estudios anteriores, hay una falta de conocimiento centrada en los edificios de nueva construcción para determinar su estanqueidad al aire n_{50} , como mejorarla y como afecta a los indicadores anuales de eficiencia energética de viviendas NZEB.

2.3 Conclusiones

En este capítulo se ha expuesto el estado del arte y la revisión bibliográfica de los trabajos existentes que analizan las dos estrategias menos desarrolladas en la industria de la construcción en España que ayudan a alcanzar los objetivos NZEB. La línea de investigación llevada a cabo se ha centrado, principalmente, en dar solución a esta problemática.

A partir de lo anterior, se ha comprobado que los trabajos existentes abordan el análisis de la situación actual pero no aportan soluciones constructivas para mejorar ni los puentes térmicos ni la hermeticidad al aire de los edificios. Existe, por tanto, una falta de conocimiento centrada en:

- Cuáles son las posibles mejoras constructivas a aplicar en los edificios, tanto en el tratamiento de los puentes térmicos, como de la hermeticidad al aire de los edificios (infiltraciones).
- Cómo afectan dichas mejoras a los indicadores de los edificios NZEB.
- Cuáles son los sobrecostes de construcción de las mejoras propuestas por toneladas de CO₂ ahorrada al año.



Biblioteca
UNIVERSITAS

CAPÍTULO 3

OBJETIVOS DE LA TESIS

Capítulo 3. Objetivos de la tesis

3.1 Objetivo principal

El objetivo principal del trabajo de investigación desarrollado en esta tesis es el de determinar cuáles son las estrategias a utilizar para alcanzar las exigencias de los edificios de consumo de energía casi nulo, NZEB, en edificios de viviendas situados en regiones con clima cálido mediterráneo.

Se parte de la hipótesis de partida de que existen estrategias suficientemente desarrolladas en la industria de la construcción (aislamiento térmico, marcos y vidrios de huecos, protecciones solares, instalaciones térmicas, energías renovables y sistemas de ventilación mecánica con o sin recuperador de calor) pero hay otras (puentes térmicos y hermeticidad al aire de la envolvente térmica) escasamente analizadas y desarrolladas. Es en esas dos últimas donde se enmarca esta investigación.

El objetivo final es que, la aplicación de las dos estrategias analizadas (puentes térmicos y hermeticidad al aire de la envolvente térmica) permita reducir las demandas energéticas de calefacción y refrigeración y, con ello, el consumo de energía primaria, permitiendo así contribuir a alcanzar los requisitos de los indicadores de los edificios NZEB.

Para lograr las metas indicadas, se han planteado las siguientes líneas de investigación: mejoras constructivas de los puentes térmicos y en la hermeticidad al aire de los edificios. En el anexo de separada de los artículos de esta memoria, se incluye el detalle de la investigación realizada y los resultados obtenidos, así como las publicaciones correspondientes.

3.2 Primera línea de investigación

3.2.1 Introducción

Esta primera línea de investigación surge por la necesidad de encontrar una estrategia que permita reducir los espesores de aislamiento térmico necesarios para alcanzar los objetivos de los edificios de vivienda NZEB.

La experiencia pone de manifiesto que en España los edificios se proyectan y construyen sin un tratamiento adecuado de los puentes térmicos, siendo habitual que la capa de aislamiento térmico de las fachadas no sea continua a lo largo de toda la envolvente térmica. Además, es habitual también que los proyectos de construcción de nuevos edificios carezcan de un estudio pormenorizado del tratamiento de los puentes térmicos.

Esta situación provoca mayores necesidades energéticas e incrementa el espesor de aislamiento térmico necesario para alcanzar los requisitos de los edificios de viviendas NZEB. En España dicho espesor se sitúa entre 4 cm y 16 cm en función de la zona climática y el tipo de elemento constructivo según [21]. Esos espesores de aislamiento térmico podrían ser inferiores si se realizara un correcto análisis y diseño de los puentes térmicos.

Durante la revisión del estado del arte se comprobó que la mayoría de investigaciones llevadas a cabo se centran en el análisis del comportamiento de los puentes térmicos, mediante la variación de su transmitancia térmica lineal, sin aportar mejoras constructivas.

Esta línea de investigación centra el análisis en los puentes térmicos de frente de forjado (encuentro de fachadas con forjados intermedios) ya que son los que mayor repercusión tienen sobre el aumento de la demanda térmica del edificio al aumentar el número de plantas de éste.

El presente estudio incluye los tipos de fachadas más habituales en la construcción de edificios de viviendas en España: fachadas de doble hoja cerámica, con hoja exterior caravista o con terminación con monocapa de cemento. Asimismo, se han contemplado diferentes espesores de aislamiento térmico en la fachada y dos tipos de forjados (unidireccionales y reticulares).

En la Figura 3.1 se muestra un detalle del encuentro entre fachadas de doble hoja cerámica y tres tipos diferentes de forjados (FR.- Forjado Reticular; FUC.- Forjado Unidireccional con bovedilla Cerámica; FUE.- Forjado Unidireccional con bovedilla de EPS).

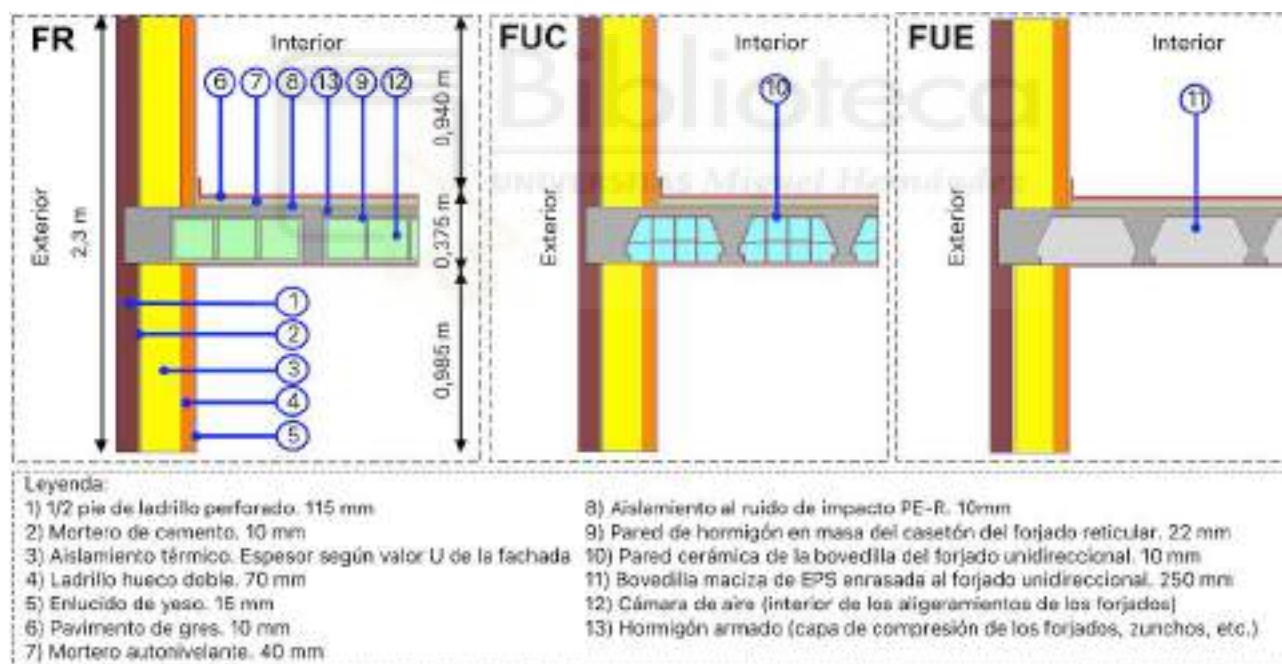


Figura 3.1: Detalle encuentro de fachadas doble hoja con tres tipos de forjado.

En resumen, esta línea de investigación se centra en los puentes térmicos de frente de forjado, cómo mejorarlos constructivamente para minimizar su impacto en términos de demanda energética y cómo afecta a los indicadores anuales de eficiencia energética de viviendas NZEB. Para ello, mediante el software THERM [34] se determina el flujo de calor en el puente térmico y, con ello, su transmitancia térmica lineal. Finalmente se utiliza el software EnergyPlus [35], para analizar dichos indicadores y se complementa con un análisis del sobrecoste de construcción de las mejoras por tonelada de CO₂ ahorrada al año.

3.2.2 Objetivos

Objetivo general.-

Diseñar soluciones constructivas, en edificios de viviendas, que permitan minimizar el impacto de los puentes térmicos de frente de forjado, en términos de reducción de la demanda de energía y que no supongan un incremento sustancial de los costes de construcción.

Objetivos específicos.-

1. Revisión bibliográfica de los estudios publicados en cuanto al comportamiento de los puentes térmicos y sus posibles mejoras constructivas. Recopilación de las metodologías empleadas, soluciones constructivas consideradas, tipos de edificios, etc.
2. Determinación de los tipos de puentes térmicos que más impacto tienen en la demanda energética de calefacción y refrigeración.
3. Determinación de los tipos de fachada y elemento resistente (forjados) más habitual en la construcción de edificios de vivienda en España y otros países del sur de Europa.
4. Identificación de la estrategia a seguir, en el diseño constructivo del edificio, para reducir el impacto, en térmicos de demanda energética, de los puentes térmicos.
5. Diseñar posibles soluciones constructivas para reducir el impacto de los puentes térmicos. Incluye su análisis térmico mediante el empleo de un software específico de simulación por elementos finitos.
6. Analizar el impacto en los indicadores de los edificios NZEB al implementar las soluciones constructivas propuestas. Incluye su análisis mediante el empleo de un software específico de simulación energética de edificios.
7. Analizar el sobrecoste de construcción necesario para reducir una tonelada de CO₂ al año, al implementar las soluciones constructivas propuestas.

3.3 Segunda línea de investigación

3.3.1 Introducción

Esta segunda línea de investigación surge por la aparición, en la normativa que regula los edificios NZEB en España [21], de una nueva exigencia sobre el nivel de estanqueidad al aire de la envolvente térmica de los edificios.

Durante la revisión del estado del arte se comprobó que las investigaciones existentes se centran en edificios de viviendas construidos en su mayoría, a mediados del siglo XX, cuando no existía ninguna normativa de eficiencia energética. Además, determinan el valor

de la estanqueidad sin aportar mejoras con el objetivo de reducir las infiltraciones en los edificios. Por tanto hay una falta de conocimiento centrada en los edificios de nueva construcción para determinar su estanqueidad al aire, como mejorarla y como afecta a los indicadores anuales de eficiencia energética de viviendas NZEB.

Por ello, esta línea de investigación tiene por objetivo cubrir la falta de conocimiento detectada, aportando datos experimentales realizados mediante ensayos Blower Door complementados con otros ensayos para localizar las zonas que generan infiltraciones (termografías, anemómetro y generador de humo) en edificios de vivienda de nueva construcción, antes y después de realizar dos mejoras diferentes para reducir las infiltraciones de aire. Además, mediante EnergyPlus [35], se realiza un análisis de los indicadores anuales NZEB y un análisis del sobrecoste de construcción de las mejoras por tonelada de CO₂ ahorrada al año.

En la Figura 3.2 se muestra un esquema de la instalación experimental utilizada para realizar los ensayos Blower Door.

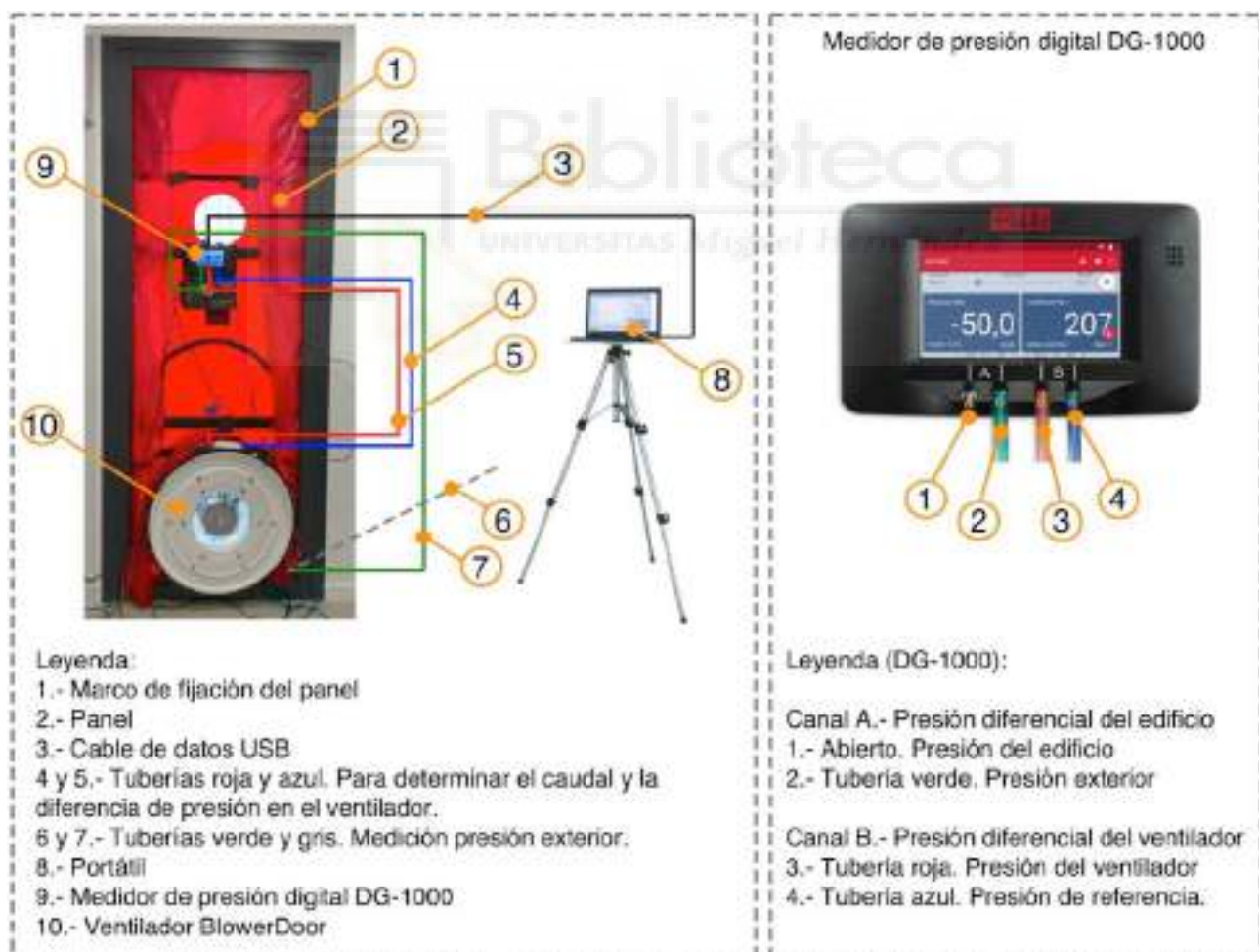


Figura 3.2: Esquema de la instalación experimental para realizar los ensayos Blower Door.

3.3.2 Objetivos

Objetivo general.-

Diseñar soluciones constructivas que permitan reducir el impacto, en términos de demanda energética, de las infiltraciones de aire que se generan en los edificios por defectos de construcción o falta de sellado, empeorando con ello la hermeticidad al aire de la envolvente térmica.

Objetivos específicos.-

1. Revisión bibliográfica de los estudios publicados sobre la hermeticidad al aire de los edificios y sus posibles mejoras constructivas. Recopilación de las metodologías empleadas, soluciones constructivas consideradas, tipos de edificios, etc. Esta revisión bibliográfica incluye la identificación del parámetro más utilizado para permitir caracterizar la hermeticidad al aire de los edificios.
2. Identificación de la instalación de medida experimental de ensayos a emplear. Dicha instalación está constituida por un equipo formado por un ventilador, un dispositivo de medición de la presión, el flujo de aire y la temperatura. Tanto la estación experimental como el ensayo se conoce como Blower Door Test y está descrito en la norma EN ISO 9972 [23].
3. Realización de los ensayos para caracterizar la hermeticidad al aire de los edificios de viviendas de nueva construcción. Los ensayos se realizan sobre diferentes edificios recién construidos en diferentes poblaciones de las provincias de Alicante, Valencia y Palma de Mallorca, todos ellos dentro del clima cálido mediterráneo.
4. Diseñar y aplicar posibles soluciones constructivas para reducir las infiltraciones de aire. Incluye su aplicación práctica en edificios construidos y repetición de ensayo Blower Door.
5. Analizar el impacto en los indicadores de los edificios NZEB al implementar las soluciones constructivas propuestas. Incluye su análisis mediante el empleo de un software específico de simulación energética de edificios.
6. Analizar el sobrecoste de construcción necesario para reducir una tonelada de CO₂ al año, al implementar las soluciones constructivas propuestas.

3.4 Publicaciones constitutivas de la tesis

A continuación, se indica la referencia al artículo publicado que sustenta esta investigación, incluye, tanto los resultados, como las contribuciones realizadas y se enmarcan dentro de revistas de impacto correspondientes al primer cuartil (Q1) del Journal Citation Reports (JCR Science Edition).

El **anexo de Separata de los artículos** se incluye una copia del artículo publicado.

Artículo 1

M.J. Romero, F. Aguilar, P. G. Vicente. *Analysis of design improvements for thermal bridges formed by double-brick façades and intermediate slabs for nZEB residential buildings in Spain.* Journal of Building Engineering 44 (2021) 103270. [6]

<https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103270>


Journal of Building Engineering

ISSN: 2352-7102. Editorial Elsevier Science BV

Factor de impacto:

- Categoría: Construction & Building Technology. JCR-SCI (2020): 5.318, Rank 13/67, Cuartil Q1
- Categoría: Engineering, Civil. JCR-SCI (2020): 5.318, Rank 13/137, Cuartil Q1



 **CAPÍTULO 4**
MATERIALES Y MÉTODOS. MEJORA CONSTRUCTIVA
DE PUENTES TÉRMICOS LINEALES DE FRENTES DE
FORJADO

Capítulo 4. Materiales y métodos. Mejora constructiva de puentes térmicos lineales de frentes de forjado

4.1 Puentes térmicos lineales en edificios

En España el Código Técnico de la Edificación dentro del Documento Básico de Ahorro de Energía DB-HE [21] clasifica los puentes térmicos lineales en los siguientes tipos de encuentro de fachadas con:

- TB1. Forjados intermedios: frentes de forjado (con o sin voladizo).
- TB2. Cubiertas planas (con o sin pretil).
- TB3. Suelos exteriores.
- TB4. Huecos. TB4.1: alfeizar; TB4.2: dinteles y cajas de persiana; TB4.3: jambas.
- TB5. Suelos en contacto con el terreno.
- TB6. Otra fachada: esquinas exteriores.
- TB7. Otra fachada: esquinas interiores.
- TB8. Pilares. TB8.1: esquina; TB8.2: integrados.

La Fig. 4.1 presenta un esquema del listado anterior de puentes térmicos lineales para una mejor identificación.

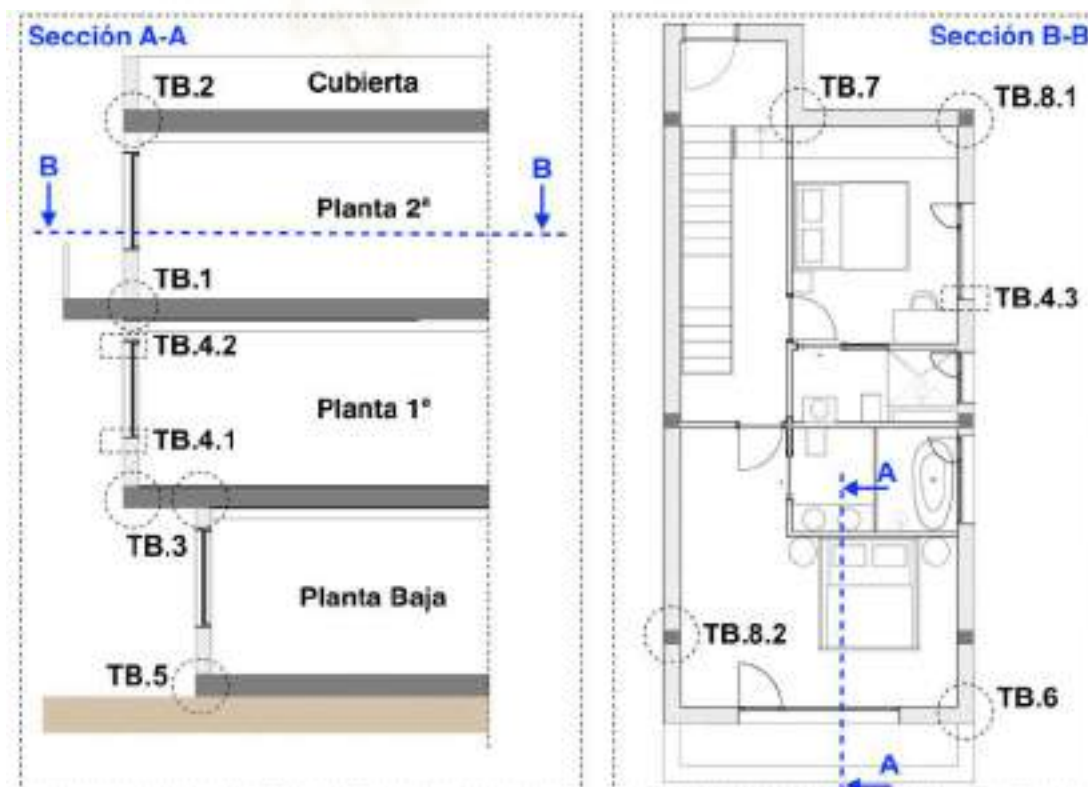


Figura 4.1: Esquema de identificación de los tipos de puentes térmicos lineales.

Si despreciamos la contribución de los puentes térmicos puntuales, el flujo de calor por conducción que se genera a través de la envolvente térmica de los edificios, entre su ambiente interior y el exterior, se puede determinar a través de la Eq. (1), considerando así la superposición del flujo de calor unidimensional (U_i) y el bidimensional (Ψ_p).

$$\phi_T = \left(\sum U_i \cdot A_i + \sum \Psi_p \cdot L_p \right) \cdot (\theta_i - \theta_e) \quad (1)$$

El flujo de calor por conducción generado por la componente bidimensional de la Eq. (1) viene determinado por el valor de la transmitancia térmica lineal del puente térmico (Ψ_p) y por su longitud (L_p). En consecuencia, al aumentar la longitud de un puente térmico lineal se genera mayor flujo de calor.

La Fig. 4.2 muestra el resultado del análisis realizado en esta investigación, sobre la geometría de un edificio residencial tipo español, fijando para ello unos datos básicos a los valores medios de construcción españoles, obtenidos de [36], (tamaño de ventana de 1,5 x 1 m, 4 viviendas por planta, 80 metros cuadrados por vivienda, etc.).

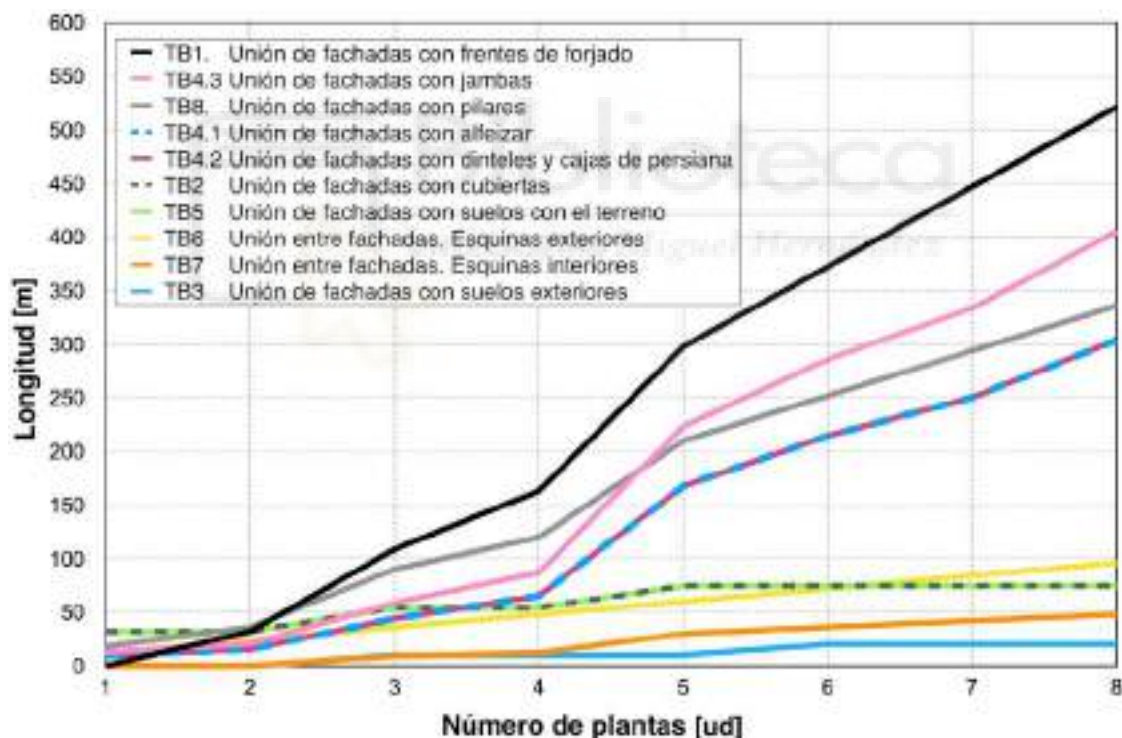


Figura 4.2: Variación de la longitud de los puentes térmicos lineales en función del número de plantas de un edificio típico de viviendas españolas.

Se comprueba que conforme aumenta el número de plantas de un edificio, los tipos de puentes térmicos que incrementan más su longitud y en consecuencia generan mayor flujo de calor, ordenados de mayor a menor, son:

- TB1. Encuentro de fachadas con forjados intermedios. Frontes de forjado (con o sin voladizo).

- TB4.3. Encuentro de fachadas con huecos: jambas.
- TB8. Encuentro de fachadas con pilares (de esquina o integrados).
- TB4.1 y TB 4.2. Encuentro de fachadas con huecos: alfeizar, dinteles y cajas de persiana (capialzados).

4.2 Puente térmico lineal con fachadas tradicionales con forjados intermedios

En este apartado se describe la solución constructiva de puente térmico que se toma como caso base o de partida para la evaluación de las mejoras. Para ello se ha seleccionado el sistema constructivo tradicional en el sur de Europa consistente en fachadas de doble hoja cerámica con aislamiento térmico intermedio.

Para facilitar más la comprensión del problema de pérdidas energéticas que se generan en un puente térmico de frente de forjado, se facilita en la Fig. 4.3, un análisis termográfico realizado en un edificio situado en Ciudad Real (España) sobre una fachada caravista con solución de doble hoja cerámica (este caso se analiza en profundidad en esta investigación). El estudio se realizó en invierno y las imágenes fueron tomadas a las 10:20 de la mañana, cuando la temperatura ambiente exterior era de 12°C. Aún cuando se ha colocado un aplacado cerámico para ocultar los frentes de forjado, éstos se detectan perfectamente en la imagen termográfica ya que, a través de esos frentes de forjados se está produciendo un mayor flujo de calor, incrementando la temperatura superficial exterior en dicha zona, tal y como se aprecia, tanto por el color de la termografía, como por el gráfico de variación de temperaturas.

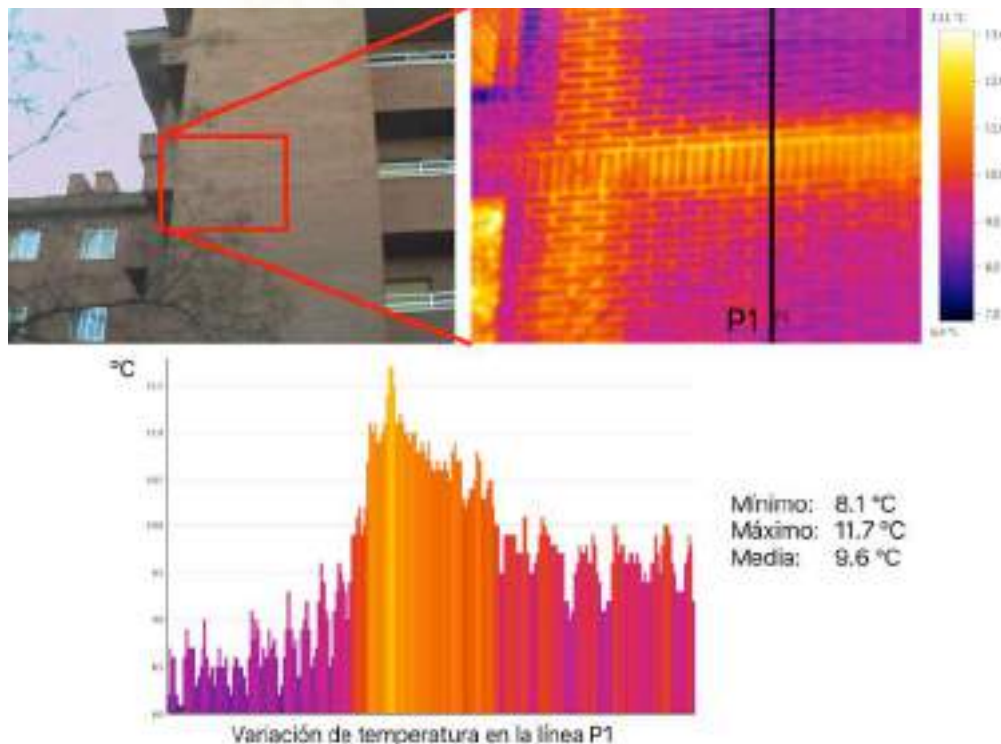


Figura 4.3: Estudio termográfico realizado sobre una fachada caravista de doble hoja cerámica.

Según las estadísticas publicadas por organismos oficiales españoles [36], las zonas climáticas del CTE DB-HE [21] B, C y D, tienen el 83,9% de viviendas existentes en España, el 84% de la población y el 82,5% del total de obra nueva de construcción de edificios de viviendas.

Y si nos centramos en las ciudades, junto con su provincia, con mayor número de viviendas de nueva construcción de toda España, nos encontramos con Alicante (zona climática B) con el 10,9%; Barcelona (zona climática C) con el 10,5% y Madrid (zona climática D) con el 27,1%. Ese es el motivo por el que se han seleccionado esas tres ciudades para este estudio.

Conforme a la Eq. (1), el flujo de calor unidimensional depende del valor de la transmitancia térmica de las fachadas. Por ello, es necesario establecer dichos valores, siendo el criterio utilizado para seleccionar el valor más bajo la referencia del estándar Passive House [20] de 0,15 W/(m²·K) y, para el resto de valores, aquellos que cubran las exigencias de los edificios NZEB en España [21] para las tres ciudades en estudio (Alicante, Barcelona y Madrid). Estos valores están indicados en la Tabla 3.

Tabla 3. Valores de transmitancia térmica U de la fachada, espesores de aislamiento térmico y tipos de forjado considerados

Valor U de la fachada W/(m ² ·K)	Espesor del aislamiento térmico, t_{AT} , con $\lambda_{AT} = 0,034$ W/m·K	Forjados intermedios
0,40	68 mm	FR. Reticular con casetón de hormigón y canto 30cm. FUC. Unidireccional con bovedilla cerámica y canto 30cm. FUE. Unidireccional con bovedilla de EPS y canto 30cm.
0,35	80 mm	
0,30	96 mm	
0,25	119 mm	
0,20	153 mm	
0,15	210 mm	

El valor U sugerido para fachadas para cumplir las exigencias de la normativa de edificios NZEB en España [21] para las tres ciudades en estudio es: Alicante: 0,38 W/(m²·K); Barcelona: 0,29 W/(m²·K); Madrid: 0,27 W/(m²·K).

El espesor de la capa de aislamiento térmico, necesario para cada uno de los valores U del muro de fachada, viene determinado por la Eq. (2):

$$t_{AT} = \lambda_{AT} \cdot \left(\frac{1}{U_{Fachada}} - R_{si} - R_{se} - \sum_{j=1}^C \frac{t_j}{\lambda_j} \right) \quad (2)$$

Donde, t_{AT} y λ_{AT} son el espesor y la conductividad térmica de la capa de aislamiento térmico respectivamente; $U_{Fachada}$ es el valor U buscado de la fachada según la Tabla 3; R_{si} y R_{se} son las resistencias térmicas superficiales interior y exterior respectivamente según la Tabla 5; y t_j y λ_j son el espesor y la conductividad térmica del resto de materiales que forman la fachada (ambos obtenidos de la Tabla 4) y C el número de materiales que forman la fachada.

La Tabla 4 recoge las propiedades de las capas de materiales identificados en las figuras 3.1, 4.4, 4.5, 4.6 y 4.7. Dichas propiedades se han obtenido del documento oficial Catálogo de Elementos Constructivos CEC [37] incluido dentro del Código Técnico de la Edificación [21]. Se trata de valores térmicos de diseño e incluyen el efecto de la temperatura y la humedad conforme a la norma ISO 10456 [38].

Las cámaras de aire no ventiladas se asignan al material predefinido en THERM [34], denominado como «frame cavity - CEN simplified». Este material automáticamente calculará una «Equivalent Thermal Conductivity ETC» a la cámara de aire conforme a lo indicado en la norma EN ISO 10077-2 [39].

Tabla 4. Propiedades consideradas para los materiales

ID	Material	Espesor mm	Conductividad térmica λ - W/(m·K)	Emisividad
1	1/2 Pie ladrillo perforado	115	0,667	0,9
2	Mortero de cemento	10	0,550	0,9
3	Aislamiento térmico	Variable	0,034	0,9
4	Ladrillo hueco doble	70	0,432	0,9
5	Enlucido de yeso	15	0,570	0,9
6	Pavimento de gres	10	2,300	0,9
7	Mortero autonivelante de cemento	40	0,550	0,9
8	Aislamiento al ruido de impacto polietileno reticulado PE-R	10	0,046	0,9
9	Pared de hormigón en masa del casetón del forjado reticular	22	1,650	0,9
10	Pared de cerámica de la bovedilla del forjado unidireccional	10	1,000	0,9
11	Bovedilla maciza EPS mecanizada enrasado del forjado unidireccional	250	0,046	0,9
12	Cámara de aire (interior aligeramientos de los forjados)	variable	Frame cavity CEN	—
13	Hormigón armado (capa de compresión de forjados, zunchos, etc.)	50	2,500	0,9
14	Perfil de acero inoxidable	4	17,0	0,9
15	Bloque de vidrio celular	100 ó 115	0,050	0,9

4.3 Puente térmico con soluciones constructivas mejoradas

En este apartado se describen las propuestas de mejora planteadas sobre la solución constructiva de partida o caso base. Las mejoras propuestas se van a aplicar sobre dos soluciones constructivas típicas de fachadas en España y en muchos países del sur de Europa, como son:

- Fachadas con hoja exterior de ladrillo caravista (casos de mejora M1, M2 y M3).
- Fachadas con acabado exterior monocapa (caso M4).

En esta investigación no se ha considerado el sistema de aislamiento térmico por el exterior ETICS ya que, si bien soluciona el puente térmico de frente de forjado e incluso otros, en el sur de Europa sólo representa el 8% del mercado europeo de dicho sistema [40].

El Estándar Passive House [20] fija como criterios de diseño para eliminar o minimizar los puentes térmicos los siguientes:

- No interrumpir la capa de aislamiento térmico en la envolvente térmica.
- Donde no se pueda dar continuidad a la capa de aislamiento térmico, el material que penetra en la capa de aislamiento térmico debe tener una conductividad térmica lo más baja posible.
- En los encuentros las capas de materiales aislantes térmicos de los diferentes componentes deben estar unidas entre sí completamente y sin interrupción.

Además, esta investigación busca que las mejoras propuestas permitan alcanzar un valor de transmitancia térmica lineal interior inferior a $0,60 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$. Conforme a [21], «se considera preferible utilizar el sistema de dimensiones interiores, ya que este es el más habitual en nuestro entorno normativo y el empleado en las herramientas oficiales para la evaluación de la eficiencia energética de los edificios».

Se ha establecido dicho valor máximo tomando como referencia la normativa de Francia y considerando que en España no hay ninguna exigencia que limite dicho valor.

En los siguientes apartados, siguiendo con los criterios anteriores, se describen las mejoras constructivas propuestas para el puente térmico de frente de forjado.

4.3.1 Fachadas con hoja exterior de ladrillo caravista

Para todos los casos que se presentan a continuación, la descripción de las capas de materiales coincide con las indicadas en la Fig. 3.1 y sus propiedades con las indicadas en la Tabla 3.

Para este tipo de fachada se han planteado tres mejoras constructivas diferentes:

Mejora M1. Hoja exterior caravista autoportante apoyada sobre un perfil de acero inoxidable en forma de L (130 x 130 mm de lado y 4 mm de espesor) anclado al frente de forjado mediante tornillos y entre dicha hoja cerámica y el frente de forjado, se dispone de una capa de aislamiento térmico de 40 mm de espesor.

La Fig. 4.4 muestra un esquema de esta mejora para las fachadas de doble hoja cerámica con forjados reticulares (FR).

Estas mismas mejoras también se han aplicado al caso de los forjados unidireccionales con bovedilla cerámica (FUC) y con bovedilla de EPS (FUE).

Además, dicha figura muestra un detalle, obtenido del informe [41], de un modelo del perfil de acero inoxidable de apoyo del ladrillo caravista con sistemas del fabricante Halfen-Deha SL [42].

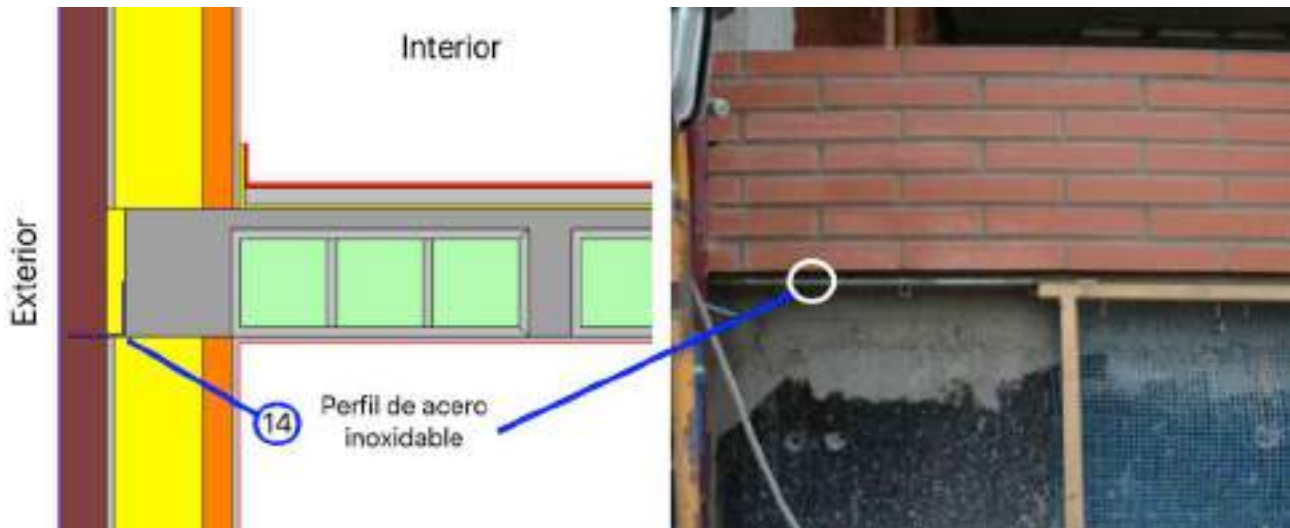


Figura 4.4: Mejora M1 considerada para reducir el puente térmico de frente de forjado con fachadas caravista. Detalle para el caso de forjados reticulares. Izquierda: esquema de la Mejora M1. Derecha: detalle del perfil de acero inoxidable.

Mejora M2. Igual al caso anterior pero situando también un aislamiento térmico de 5 mm de espesor entre el perfil de acero inoxidable y el frente de forjado. Las características del perfil y sus sistema de anclaje es el mismo que en el caso M1. La Fig. 4.5 muestra un esquema de esta mejora para las fachadas de doble hoja cerámica con forjados reticulares (FR). Estas mismas mejoras también se han aplicado al caso de los forjados unidireccionales con bovedilla cerámica (FUC) y con bovedilla de EPS (FUE).

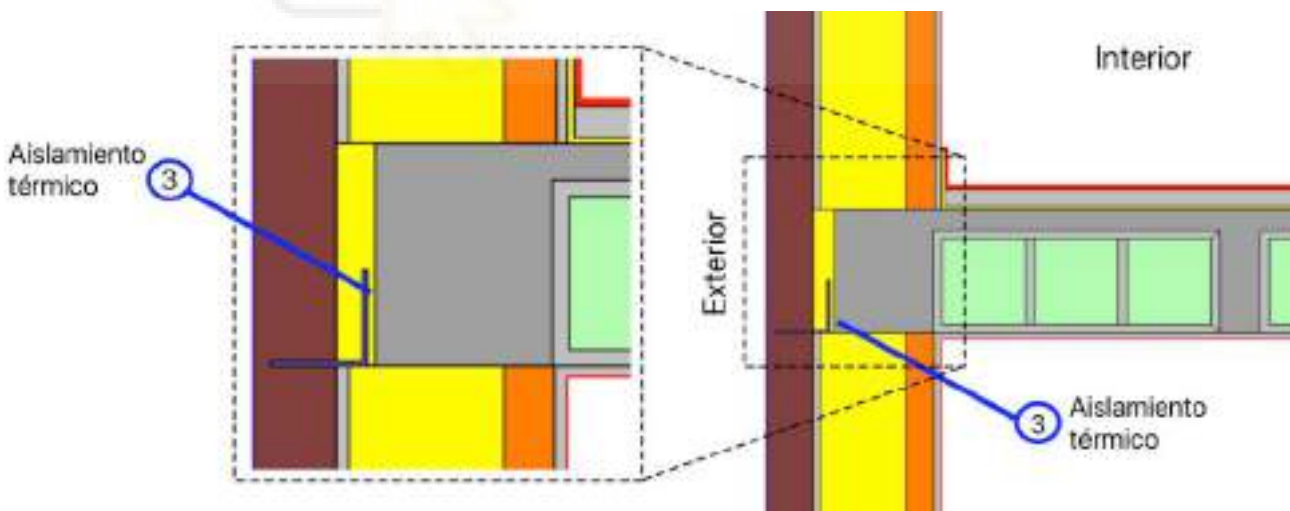


Figura 4.5: Mejora M2 considerada para reducir el puente térmico de frentes de forjado con fachadas caravista.

Tanto en la mejora M1 como en la M2, el perfil de acero inoxidable está fijado con pernos al frente de forjado. Estos pernos generan puentes térmicos puntuales que no se han considerado en esta investigación, quedando para trabajos futuros.

Mejora M3. Hoja exterior caravista confinada entre los forjados. Para intentar dar continuidad a la capa de aislamiento térmico se emplean tres elementos: sustitución de la primera línea de aligeramientos del forjado por piezas de poliestireno expandido EPS, sustitución de la primera y última hilada de ladrillos de la hoja interior cerámica por bloques de vidrio celular y la colocación, bajo el pavimento y en todo su perímetro, de una banda de aislamiento térmico de 50 cm de ancho y 3 cm de espesor.

Constructivamente, en este caso no es viable colocar un aislamiento térmico en el frente de forjado como en los casos M1 y M2 ya que, por temas de estabilidad mecánica, la hoja exterior caravista no puede sobresalir del frente de forjado más de un tercio de su espesor (unos 4 cm). Este espesor tan reducido impide colocar una plaqueta cerámica, mortero y capa de aislamiento. Este es el motivo por el que se ha trabajado sobre la hoja interior para intentar conseguir la deseada continuidad del aislamiento térmico.

La Fig. 4.6 muestra un esquema de esta mejora para las fachadas de doble hoja cerámica con forjados reticulares (FR). Estas mismas mejoras también se han aplicado al caso de los forjados unidireccionales con bovedilla cerámica (FUC) y con bovedilla de EPS (FUE).

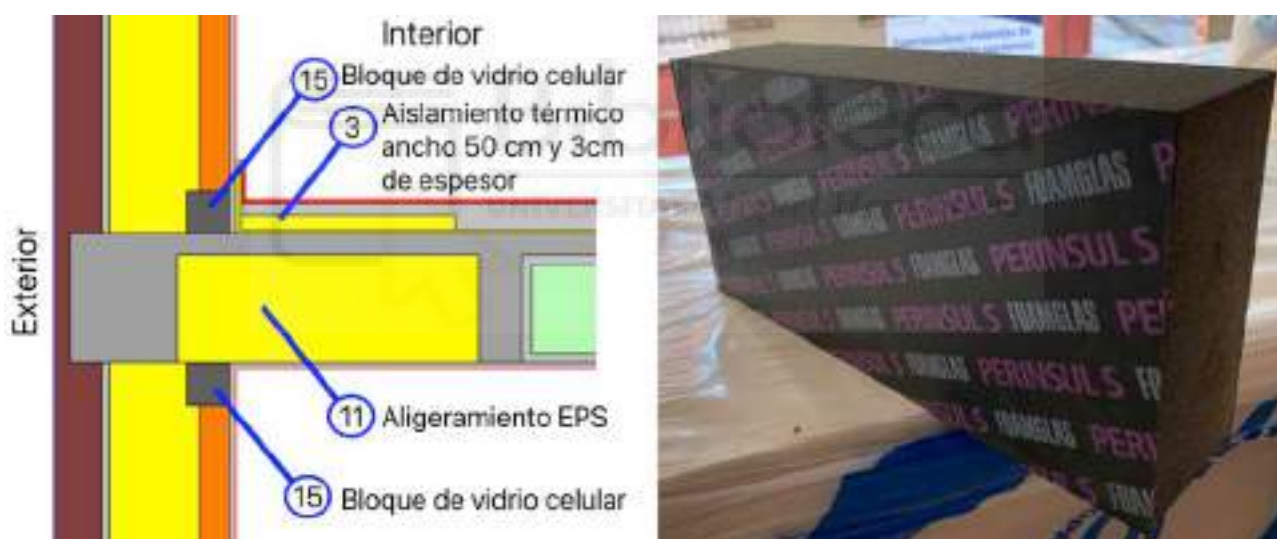


Figura 4.6: Mejora M3 considerada para reducir el puente térmico de frentes de forjado con fachadas caravista. Izquierda: esquema de la mejora M3. Derecha: detalle del bloque de vidrio celular.

Hay que destacar que, sólo la mejora M1 está disponible como una solución habitual en el mercado español.

Las soluciones M2 y M3 son un desarrollo generado a través de esta investigación. Dichas soluciones buscan reducir el puente térmico manteniendo las soluciones constructivas tradicionales, incorporando, para ello, una serie de materiales para dar continuidad al aislamiento térmico (bloques de vidrio celular, aislamiento detrás del perfil metálico de apoyo de la hoja exterior cerámica, aligeramientos de EPS, etc.).

4.3.2 Fachadas con acabado exterior monocapa

Para este tipo de fachada se ha planteado una única mejora constructiva:

Mejora M4. La hoja cerámica exterior de la fachada se encuentra confinada entre dos forjados.

Dicha hoja cerámica vuela un tercio de su espesor para permitir colocar una capa de aislamiento térmico de 4 cm en el frente de forjado.

Para dar continuidad a la capa de aislamiento térmico de la fachada, la primera y última hilada de ladrillos de la hoja exterior, se sustituye por bloques de vidrio celular que permiten la conexión aislante entre la capa de aislamiento térmico del frente de forjado y la capa de aislamiento térmico situada en el interior de la fachada.

Exteriormente, toda la fachada se reviste con mortero monocapa reforzado con malla de fibra de vidrio en la zona del frente de forjado, evitando así posibles fisuras por la existencia de cambio en el tipo de material (ladrillo, vidrio celular y aislamiento térmico).

La Fig. 4.7 muestra un esquema de esta mejora.

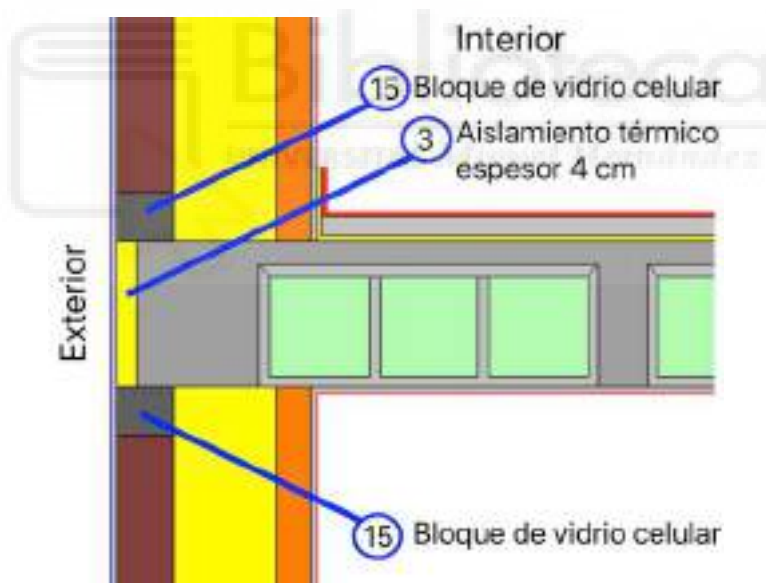


Figura 4.7: Mejora M4 considerada para reducir el puente térmico de frentes de forjado con fachadas con acabado exterior monocapa.

4.4 Determinación de la transmitancia térmica lineal

Una vez descritas las mejoras propuestas, se va a evaluar el impacto de éstas sobre la demanda energética, el consumo y las emisiones de CO₂ de un edificio tipo. Este estudio se lleva a cabo sobre tres ciudades con clima mediterráneo, como son: Alicante, Madrid y Barcelona.

La investigación se ha desarrollado a través de las siguientes etapas:

- Definición y caracterización del puente térmico lineal de frente de forjado con fachadas caravista de doble hoja cerámica (caso base);
- Definición y caracterización de las mejoras que permitan alcanzar un valor de transmitancia térmica lineal interior inferior a $0,60 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, buscando diseñar al menos tres casos de mejora que cumplan con ese valor;
- Comparación entre los resultados obtenidos (base y mejoras) y validación por comparación con valores oficiales o de referencia.
- Simulación energética de un edificio de viviendas para determinar el impacto del puente térmico lineal en términos de demanda de energía, consumo de energía primaria total y no renovable, emisiones de CO_2 y sobrecoste de construcción por cada tonelada de CO_2 ahorrada;

La Fig. 4.8 muestra el esquema seguido para el desarrollo de esta investigación. Se ha realizado un proceso iterativo con el objetivo de encontrar aquellas mejoras que permitan alcanzar un valor de transmitancia térmica lineal interior del puente térmico de frente de forjado inferior a $0,60 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ (valor máximo permitido en Francia), mostrando en esta tesis sólo las mejoras que cumplen con dicho criterio.

La generación de las mejoras se ha realizado de forma manual diseñando posibles soluciones que den la mayor continuidad posible a la capa de aislamiento térmico. A continuación se ha determinado el valor de la transmitancia térmica lineal comprobando con ello si es inferior o no a $0,60 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$.

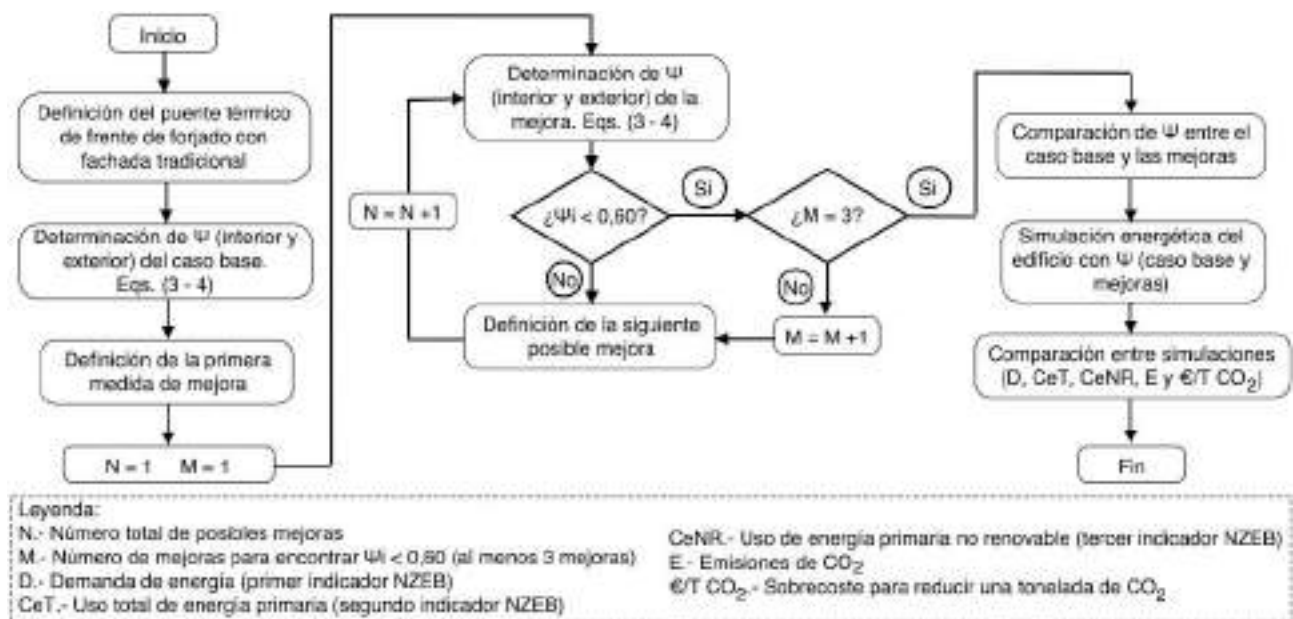


Figura 4.8: Diagrama de flujo empleado para la evaluación del puente térmico de frente de forjado con fachadas de doble hoja cerámica y sus posibles mejoras.

Como complemento, se ha analizado el riesgo de formación de condensaciones superficiales y crecimiento de moho en la zona del puente térmico.

En esta investigación se ha empleado el método detallado aplicando la norma EN ISO 10211 [7], para el que existen diferentes herramientas software de evaluación, por elementos finitos, del comportamiento energético de los puentes térmicos.

En nuestro caso, emplearemos el software THERM [34] en su versión 7.7.10 (publicada el 23 de diciembre de 2019). Con THERM [34] se obtiene el valor del flujo de calor Φ_L por metro lineal del puente térmico. Dicho flujo de calor se obtiene, tanto para las dimensiones interiores, como para las exteriores del puente térmico.

THERM [34] es un software para la evaluación de puentes térmicos con flujo de calor bidimensional.

Empleando su interfaz gráfica se dibuja el detalle del puente térmico a evaluar (modelo geométrico), se definen los distintos materiales que forman sus elementos constructivos, las condiciones de contorno y se lanza la simulación.

El primer paso que realiza THERM [34] en la simulación, es la generación de una malla sobre toda la superficie del modelo geométrico.

Dicha malla se genera de forma automática a través del algoritmo “Finite Quadtree” y su funcionamiento está descrito en el “Appendix C” del Manual de Usuario de THERM [34].

La malla está formada por un número finito de subregiones no superpuestas, denominadas como elementos, que cubren toda la región analizada.

Cuando la malla está creada, THERM [34] la envía automáticamente al solver de elementos finitos denominado como “Conrad”.

Una vez realizado el modelo geométrico del puente térmico en THERM [34], definidos los materiales que forman cada solución constructiva conforme a la Tabla 4, las condiciones de contorno conforme a la Tabla 5, se procede a realizar la simulación con el software obteniendo con ello el valor del flujo de calor Φ_L por metro lineal del puente térmico lineal.

Dicho flujo de calor se obtiene tanto para las dimensiones interiores como para las exteriores del puente térmico.

La Fig. 4.9 muestra tres imágenes del proceso de cálculo para la mejora M4: superior izquierda distribución de las isóneas de temperatura, superior derecha infrarrojo (zonas con el mismo valor de flujo de calor) e inferior detalle de la zona del frente de forjado y la dirección del flujo de calor (puntos discontinuos).

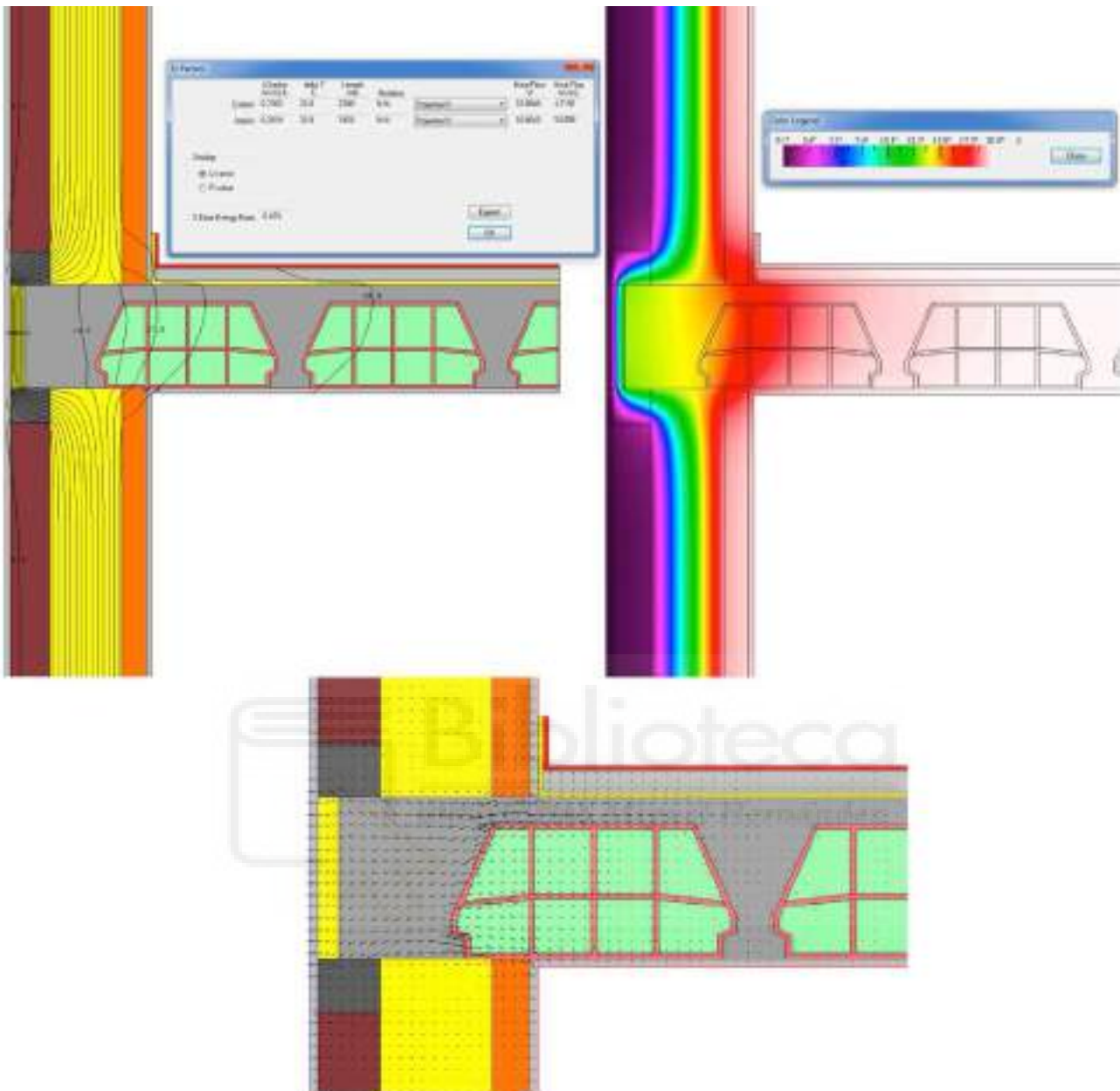


Figura 4.9: Imágenes del proceso de cálculo con THERM.

A partir del flujo de calor se puede determinar L^{2D} empleando la Eq. (3). L^{2D} es el coeficiente de acoplamiento térmico para el cálculo bidimensional y está expresado para las dimensiones interiores o exteriores del puente térmico en función del flujo de calor utilizado.

$$L^{2D} = \frac{\phi_l}{(\theta_i - \theta_e)} \quad (3)$$

Por último, la transmitancia térmica lineal Ψ del puente térmico se determina a través de la Eq. (4). Para el caso de los puentes térmicos de frente de forjado, U_j representa la transmitancia térmica de la fachada y L_j representa la dimensión interior o exterior de la fachada en dicho puente térmico.

$$\psi = L^{2D} - \sum_{j=1}^N U_j \cdot L_j = \frac{\phi_l}{(\theta_i - \theta_e)} - \sum_{j=1}^N U_j \cdot L_j \quad (4)$$

En función de la dimensión del puente térmico considerada se obtendrá la transmitancia térmica lineal interior (ψ_i) o exterior (ψ_e).

La transmitancia térmica U_j de la fachada se determina a través de la Eq. (5) en la que R_{si} es la resistencia superficial interior, R_{se} es la resistencia superficial exterior (ambas obtenidas de la Tabla 4), t_i y λ_i son respectivamente el espesor y la conductividad térmica de cada material de la fachada (ambos obtenidos de la Tabla 4) y C el número de materiales que forman la fachada.

$$U_j = \frac{1}{(R_{si} + \sum_{i=1}^C \frac{t_i}{\lambda_i} + R_{se})} \quad (5)$$

El modelo geométrico considerado en la definición del puente térmico para determinar L^{2D} cumple con los requisitos indicados en la norma EN ISO 10211 [7] en la definición de los planos de corte, dimensiones, etc.

Tabla 5. Condiciones de contorno consideradas para ser utilizadas en THERM

Temperaturas		Resistencias superficiales		Coeficiente de película	
θ_e Exterior	0°C	R_{se} Exterior	0,04 (m ² K)/W	h_{se} Exterior	25 W/(m ² K)
θ_i Interior	20°C	R_{si} Interior flujo horizontal	0,13 (m ² K)/W	h_{si} Interior flujo horizontal	7,69 W/(m ² K)

Las condiciones de contorno indicadas en la Tabla 5 anterior son válidas para los países del sur de Europa.

En los países centroeuropeos normalmente se utiliza como temperatura exterior -10°C y un salto térmico de 30°C.

Se ha realizado un análisis para determinar la influencia en el valor de transmitancia térmica lineal, de la definición de la geometría de los forjados. Es decir, identificar si influye o no el representar el forjado como una capa de material continua con su correspondiente valor de conductividad térmica, obtenida de CEC [37] o es necesario representar el forjado con dos zonas: una maciza de hormigón armado (zunchos de borde, nervios, viguetas y capa de compresión) y otra con el aligeramiento (casetón de hormigón, bovedilla cerámica o bovedilla de EPS y las cámaras de aire).

En la Fig. 4.10 se facilita un detalle del modelo definido con forjado como capa continua o con dos zonas (hormigón armado y elementos aligerantes).

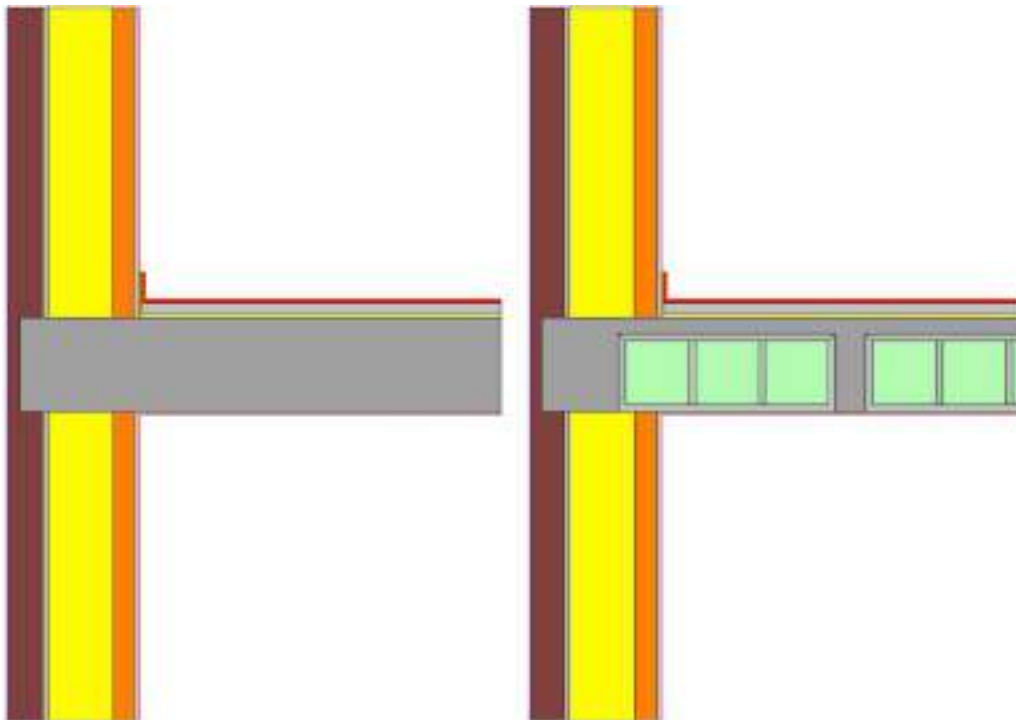


Figura 4.10: Izquierda modelo con forjado como capa continua. Derecha diferenciando materiales.

Los resultados obtenidos muestran que el valor de la transmitancia térmica lineal aumenta en el caso de representar el forjado con dos zonas y esto se debe a que, si se considera el forjado como una capa homogénea con una conductividad térmica promedio, se está despreciando el incremento del flujo de calor que se genera, entre otros puntos, en los zunchos de borde de hormigón armado que tiene una conductividad térmica superior al valor promedio del forjado considerado como una capa homogénea. Además, dicha variación también depende del tipo de aligeramiento.

Así, para los casetones de hormigón la variación en la transmitancia térmica lineal interior se sitúa entre un 1,4% y un 2,4% en función del valor U de la fachada; para el caso de bovedillas cerámicas se sitúa entre un 32,5% y un 38,1%; y para el caso de bovedillas de EPS se sitúa entre un 53,1% y un 57,6%. Por todo lo anterior, el modelo definido en THERM [34] no se ha representado como una capa continua e incluye las dos zonas: hormigón armado y elementos de aligeramiento.

Aplicando el factor de temperatura superficial interior mínimo $f_{Rsi,min}$ indicado en [7] y el valor mínimo de dicho factor establecido en España en el documento [21], se obtiene que la temperatura mínima en la superficie interior del puente térmico, para que no se produzcan condensaciones superficiales, es de 12,8°C. En esta investigación se ha comprobado que, para las mejoras propuestas, en la zona del puente térmico, la temperatura superficial interior θ_{si} se encuentra siempre por encima de dicho valor.

4.5 Simulación energética

La forma de considerar un puente térmico en las herramientas de simulación energética es a través de su longitud y del valor de su transmitancia térmica lineal. La simulación se ha desarrollado empleando el motor de cálculo EnergyPlus [35] versión 9.1 que es ampliamente utilizado en la comunidad científica. Como se ha indicado anteriormente, se han considerado tres ciudades españolas: Alicante, zona climática de invierno B según [21], Barcelona, zona climática de invierno C según [21] y Madrid, zona climática de invierno D según [21].

Los resultados obtenidos se expresan en términos de los indicadores de los edificios NZEB en España según [21]: demanda de energía, consumo total de energía primaria y consumo total de energía primaria no renovable. Estos indicadores cumplen el esquema fijado en la norma EN ISO 52000-1 [5]. Adicionalmente se facilita también el indicador de emisiones de CO₂.

Para su determinación se han utilizado las instalaciones de referencia indicadas en la normativa española [21] siendo, para calefacción, una caldera con un rendimiento del 92% y vector energético gas natural y para refrigeración, una máquina frigorífica con un rendimiento EER de 2,60 y vector energético electricidad. Igualmente, los coeficientes de paso a consumo de energía primaria y emisiones de CO₂ se corresponden con los indicados en la normativa española [43].

Como complemento, se realiza un análisis económico para obtener el sobrecoste de construcción necesario con cada medida de mejora para lograr una reducción de una tonelada de CO₂ al año.

La Fig. 4.11 muestra el modelo desarrollado con la herramienta de simulación energética y una imagen real del edificio formado por 18 viviendas con la distribución por usos de cada planta y superficies útiles indicado en la Tabla 6. Para ello se ha empleado la herramienta CYPETHERM HE Plus [44] el cual incorpora, como motor de cálculo, EnergyPlus [35].



Figura 4.11: Modelo desarrollado en CYPETHERM HE Plus y edificio real.

Tabla 6. Distribución por plantas del edificio en estudio

	Sótano	Planta baja	Plantas 1 a 3	Planta 4 y 5	Planta 6	Planta 7
Uso	Aparcamientos	Distribución e instalaciones	4 viviendas por planta	2 viviendas por planta	2 viviendas por planta	Salida a cubierta
Superficie útil por vivienda (m ²)	-	-	89	96	84	-
Número de dormitorios	-	-	3	4	3	-

La Tabla 7 muestra los valores sugeridos de la transmitancia térmica U para cada elemento de la envolvente térmica según [21].

 Tabla 7. Valores U de transmitancia térmica de referencia para las ciudades estudiadas

Localidad, altitud y zona climática			Valores $U - W(m^2 \cdot K)$			
			Fachadas	Cubiertas	Suelos exteriores	Ventanas
Alicante	0 msnm	B4	0,38	0,33	0,38	2,00
Barcelona	13 msnm	C2	0,29	0,23	0,29	2,00
Madrid	667 msnm	D3	0,27	0,22	0,27	1,60

La Tabla 8 muestra los valores de transmitancia térmica lineal interior de los puentes térmicos obtenidos del documento DA DB-HE/3 [21] aplicando los valores U de la Tabla 7.

Dichos valores dependen del valor de transmitancia térmica de las fachadas. Se ha considerado el sistema constructivo habitual en España en el que no se mejoran los puentes térmicos.

 Tabla 8. Valores de la transmitancia térmica lineal interior Ψ_i consideradas para los diferentes puentes térmicos

Tipo de encuentros de fachada con:	Valores $\Psi_i - W/(m \cdot K)$ para los puentes térmicos		
	Alicante	Barcelona	Madrid
Cubiertas (sin continuidad del aislamiento térmico)	0,92	0,91	0,90
Suelos exteriores (sin continuidad del aislamiento térmico)	0,83	0,83	0,83
Esquinas salientes	0,07	0,06	0,06
Esquinas entrantes	-0,10	-0,08	-0,08
Ventanas: dinteles (pequeña separación entre el aislamiento y los marcos de las ventanas)	0,72	0,75	0,77
Ventanas: jambas (pequeña separación entre el aislamiento y los marcos de las ventanas)	0,44	0,45	0,46
Ventanas: alfeizar (pequeña separación entre el aislamiento y los marcos de las ventanas)	0,16	0,17	0,17
Pilares (continuidad del aislamiento térmico)	0,01	0,00	0,00
Frentes de forjado	Ver apartado 6.3 de esta tesis		

La Fig. 4.12 muestra, para el caso base y para el edificio de viviendas analizado, una comparativa entre los diferentes tipos de puentes térmicos identificados en la Fig. 4.1 en función del peso que representa cada uno de ellos en términos de la componente bidimensional del flujo de calor indicada en la Eq. (1). El puente térmico formado por el encuentro de fachadas con forjados intermedios (frente de forjado), representa más del 52% al flujo de calor total por los puentes térmicos.

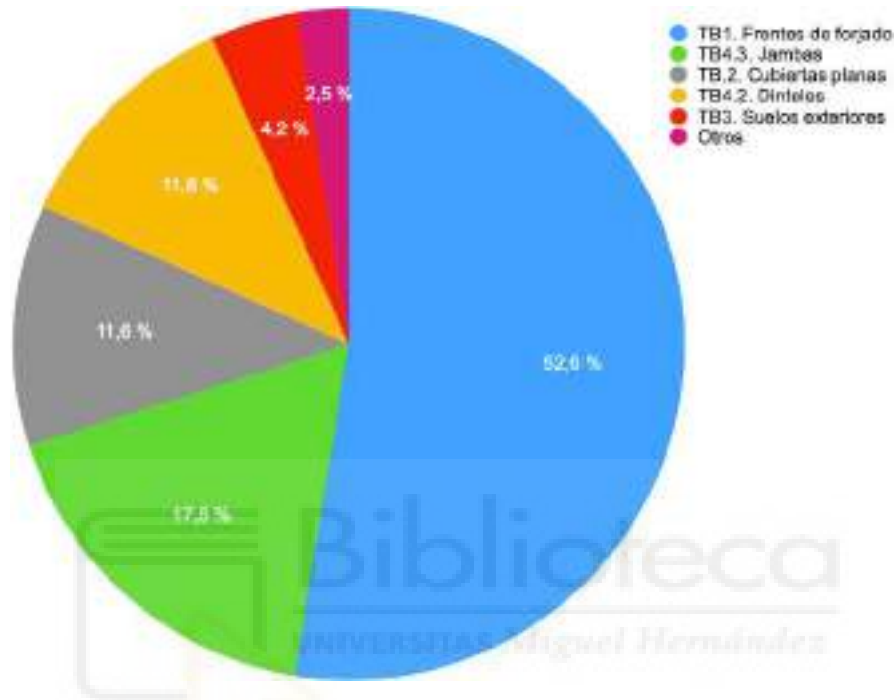


Figura 4.12: Comparativa entre tipos de puentes térmicos en función de su contribución a la componente bidimensional del flujo de calor según Eq. (1) en el caso base del edificio en estudio.

En el apartado 2. *Material and Methods* de la publicación [6] que constituye esta tesis, se describe con detalle los materiales y métodos empleados, así como los criterios seguidos para diseñar las mejoras constructivas de los puentes térmicos.

CAPÍTULO 5
MATERIALES Y MÉTODOS. MEJORA DE LA
HERMETICIDAD AL AIRE DE LA ENVOLVENTE
TÉRMICA DE LOS EDIFICIOS

Capítulo 5. Materiales y métodos. Mejoras de la hermeticidad al aire de la envolvente térmica de los edificios

5.1 Equipo de ensayos

En la mayoría de los países europeos en los que, por normativa, están limitadas las infiltraciones en los edificios, se emplea el parámetro n_{50} para su caracterización [45].

El método de obtención del parámetro n_{50} mediante ensayo Blower Door se encuentra descrito en la norma EN ISO 9972 [23]. Consiste en la instalación de un equipo formado por un ventilador, un dispositivo de medición de la presión, el flujo de aire y la temperatura. La medición se lleva a cabo mediante dos métodos: presurización (la presión en el interior del edificio es mayor que en el exterior) y despresurización (la presión en el interior del edificio es inferior que en el exterior), todo ello realizado en un rango de diferencias de presión con incrementos de no más de 10 Pa. En cada ensayo se deben definir, al menos, cinco puntos equidistantes entre las diferencias de presión menor y mayor.

La Fig. 5.2 muestra el equipo instalado en una vivienda ubicada en Valencia y analizada en esta tesis, durante el desarrollo de un ensayo. Un esquema de dicha instalación se puede ver en la Fig. 3.2 del **Capítulo 3 Objetivos de la tesis**.



Figura 5.1: Equipo instalado en una vivienda analizada durante la realización de un ensayo.

La norma [23] establece tres métodos de ensayo y de preparación del edificio:

- Método 1: se ensaya el edificio en uso donde las aberturas de ventilación natural se han cerrado y sellado todos los sistemas de ventilación mecánica y cerrado las aberturas de aire acondicionado.
- Método 2: se ensaya la envolvente del edificio donde todas las aberturas se han sellado intencionadamente, cerrando las puertas, ventanas y trampillas.
- Método 3: se ensaya el edificio para un propósito específico donde el tratamiento de las aberturas se desarrolla conforme la norma o regulación nacional.

El CTE en su DB-HE [21] establece que se empleará el método 1 ó 2 indicado anteriormente.

Para los objetivos de esta investigación se considera más adecuado el Método 2 ya que se pretende analizar la estanqueidad de la envolvente del edificio. Durante la realización del ensayo se ha asegurado la preparación de cada vivienda conforme a dicho método.

El equipo empleado para realizar los ensayos es el Minneapolis Blower Door Standard formado por el ventilador modelo 4 (230V) y el micromanómetro DG1000, todo ello gestionado con el software TECTITE Express versión 5.1 [46].

Se complementa con los elementos de conexión (tuberías entre el ventilador y el micromanómetro y el cable de datos USB con el ordenador) junto con el marco y panel para el montaje del sistema en una puerta de la vivienda a ensayar.

El micromanómetro DG1000 tiene una incertidumbre de medida de 0,9% de la presión medida o $\pm 0,12$ Pa (lo que sea mayor) que cumple con la norma EN ISO 9972 [23] que exige una incertidumbre de ± 1 Pa.

El software TECTITE Express [46] determina, entre otros, el parámetro n_{50} que se obtiene mediante la Eq. (6).

$$n_{50} = \frac{q_{50}}{V} \quad (6)$$

Donde q_{50} es la tasa de renovación o fuga de aire para la presión de 50 Pa (m^3/h) y V es el volumen libre interior del edificio ensayado (m^3). La tasa de renovación o fuga de aire q_{50} se obtiene a partir de la diferencia de presión conforme a la norma EN ISO 9972 [23].

La Fig. 5.2 muestra la pantalla de resultados del software TECTITE Express [46] durante el desarrollo de uno de los ensayos.

En la gráfica el caudal obtenido para una presión de 50 Pa representa la tasa de renovación o fuga de aire para dicha presión o q_{50} .

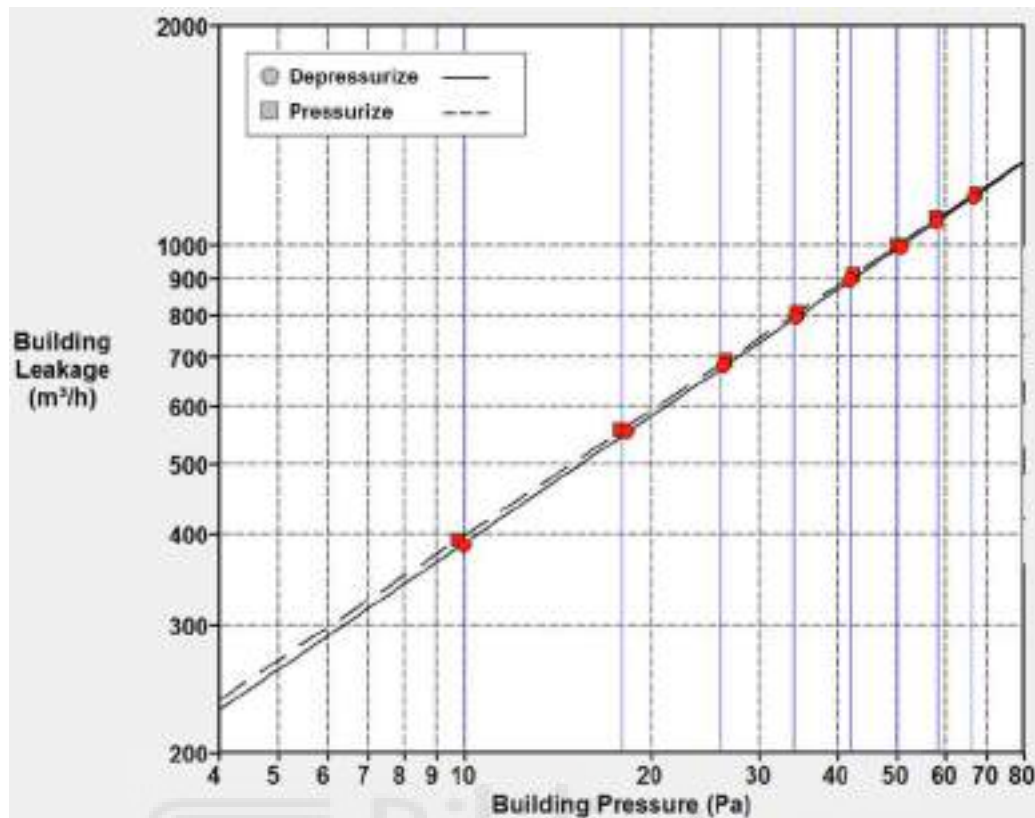


Figura 5.2: Resultado del software TECTITE Express durante uno de los ensayos realizados.

Para caracterizar los edificios de nueva construcción, se han realizado ciento once ensayos Blower Door en seis ciudades españolas: 22 en Alicante, 2 en Elche, 12 en Denia, 1 en El Campello, 56 en Valencia y 18 en Palma de Mallorca.

Todos los edificios analizados son de vivienda plurifamiliar construidos entre 2020 y 2022. Cumplen con las exigencias del Código Técnico de la Edificación (DB-HE 2013 o DB-HE 2019) [21].

La ventilación de cada vivienda se produce de forma híbrida (entrada de aire de tipo natural y extracción de aire de tipo mecánico).

Para la climatización, disponen de sistemas partidos individuales con expansión directa con bomba de calor aire - agua o aire - aire. En ambos casos, con unidad exterior fuera de la vivienda y unidad interior en la cocina o en el aseo y un conducto a lo largo del pasillo para la distribución del aire climatizado.

Para el agua caliente sanitaria se emplea el equipo de climatización aire - agua o bien calderas individuales situadas en el exterior de cada vivienda (por ejemplo, en la galería de las cocinas).

Las soluciones constructivas de la envolvente térmica son las habituales en España: fachadas de doble hoja de ladrillo con aislamiento térmico intermedio, cubiertas planas transitables y ventanas metálicas o de PVC con cierre oscilobatiente.

En la Tabla 9 se indican las características de las viviendas analizadas y la cantidad total de viviendas ensayadas de cada tipo.

Tabla 9. Características de las viviendas analizadas

Número de dormitorios	Total viviendas ensayadas	Valores medios		
		Superficie útil m ²	Volumen m ³	Superficie de la envolvente térmica m ²
1	1	46,21	112,84	176,82
2	31	62,14	152,33	223,80
3	66	85,16	210,81	285,36
4	13	104,06	259,63	343,43

Como complemento al ensayo Blower Door, se han utilizado otros equipos de ensayo (cámara termográfica, anemómetro y generador de humo) para localizar zonas o puntos que generan infiltraciones por falta de sellado. Con dichos equipos se ha podido comprobar, que en el caso de los edificios de nueva construcción plurifamiliares, los defectos de hermeticidad generalmente se producen en los puntos en los que las diferentes instalaciones (fontanería, electricidad, telecomunicaciones, conductos de ventilación, etc.) atraviesan los cerramientos del edificio y también en las juntas que se producen entre las ventanas y la parte opaca de las fachadas.

La Fig. 5.3 muestra el empleo del anemómetro para localizar zonas de entrada o salida de aire, tanto en el contorno de ventanas, como en las instalaciones. Este ensayo es de tipo cuantitativo ya que permite determinar el caudal de aire que está circulando por una zona con problemas de sellado.



Figura 5.3: Localización de defectos de hermeticidad mediante anemómetro utilizado para localizar entradas o salidas de aire en las cajas de persiana e instalaciones.

La Fig. 5.4 muestra el empleo del generador de humo para localizar las zonas con problemas de sellado (falta de hermeticidad). Se trata de un ensayo cualitativo que permite identificar dichas zonas por la turbulencia que genera el flujo de aire procedente de las infiltraciones o exfiltraciones, en el humo.

Las dos imágenes de la izquierda muestran una bisagra y una cinta de persiana con defectos de sellado. En ambos casos, se ha empleado una “mecha” generadora de humo.

Las dos imágenes de la derecha muestran el empleo de un equipo especial generador de humo. Se aprecia la entrada de humo tanto en la parte inferior de la ventana como a través de las luminarias instaladas en el techo (el humo accede al falso techo por la caja de persiana y sale al interior de la vivienda por las luminarias).



Figura 5.4: Localización de defectos de hermeticidad en ventanas mediante generador de humo.

La Fig. 5.5 muestra el empleo de la termografía para localizar zonas de entrada de aire en el contorno de ventanas. En este caso, estas termografías se realizaron a las 09:00 horas cuando el aire exterior (imagen izquierda 20,3°C, derecha 17,1°C), a menos temperatura que el aire interior (imagen izquierda 23,1°C, derecha 21,9°C), enfría las superficies interiores mostrándose en las imágenes como líneas de color azul oscuro.

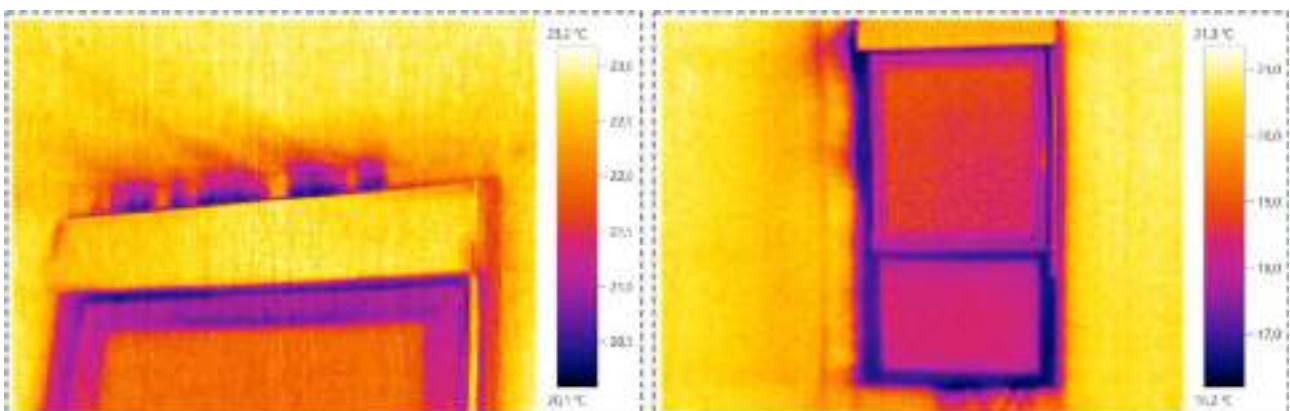


Figura 5.5: Localización de defectos de hermeticidad en ventanas mediante el empleo de la termografía.

5.2 Problemas de hermeticidad en los edificios de viviendas de nueva construcción

Las viviendas analizadas disponen de muchos elementos que atraviesan los cerramientos exteriores (tuberías de refrigerante que conectan la unidad exterior con la interior; tuberías de agua fría o agua caliente; instalaciones de electricidad o de telecomunicaciones; conductos de extracción de la ventilación; tuberías de evacuación de agua sucia). En los casos en los que las viviendas disponen de terraza, existen luminarias exteriores conectadas al interior de la vivienda.

Todos esos pasos de instalaciones, que atraviesan los cerramientos exteriores, son zonas potenciales de generación de infiltraciones de aire.

Por otro lado, el perímetro de las ventanas (zona de conexión de los marcos de las ventanas con la parte opaca de las fachadas) y las cajas de persiana, son también zonas potenciales de generación de infiltraciones de aire.

En los edificios de nueva construcción no es habitual, en España, prestar atención a las infiltraciones de aire.

Por ello, habitualmente no se sellan los pasos de instalaciones, dejando orificios y juntas que comunican con el exterior y generan infiltraciones de aire y, en las ventanas, se trata su perímetro (zona de conexión de marcos de ventanas con la parte opaca de las fachadas) con espuma de poliuretano estándar que deja pequeños orificios que generan infiltraciones de aire.

La Fig. 5.6 muestra detalles de la práctica habitual en el perímetro de las ventanas en la que se emplea espuma de poliuretano estándar que deja pequeños orificios.



Figura 5.6: Práctica habitual. Relleno del perímetro de ventanas con espuma de poliuretano generando pequeños orificios que generan infiltraciones de aire.

La Fig. 5.7 muestra detalles de la práctica habitual en las zonas de paso de instalaciones dejando huecos en los cerramientos.



Figura 5.7: Práctica habitual. Diferentes ejemplos de orificios y agujeros dejados en los puntos de paso de instalaciones.

5.3 Mejoras propuestas

Se proponen dos mejoras:

- **M1 - Mejora básica.** Emplea materiales básicos habituales en las obras de construcción. Para ello, se propone emplear espuma de poliuretano estándar o enlucido de yeso para rellenar los orificios del paso de instalaciones y espuma de poliuretano estándar más enlucido de yeso para el perímetro de ventanas y cajas de persiana.
- **M2 - Mejora avanzada.** Emplea materiales avanzados que existen en el mercado pero que sólo se utilizan en viviendas construidas bajo el estándar Passive House [20]. Para ello, se propone emplear espuma flexible de poliuretano y membranas líquidas o láminas de sellado para el paso de instalaciones y cintas precomprimidas de poliuretano, espuma flexible de poliuretano y membrana líquida para el perímetro de ventanas y cajas de persiana.

Además de por la tasa de renovación de aire n_{50} alcanzado por cada mejora, también se diferencian por los costes económicos de cada una.

Como paso previo al tratamiento indicado en cada mejora, se propone emplear pasamuros de PVC para el paso de las instalaciones a través de los cerramientos exteriores en lugar de realizar la práctica habitual consistente en picar los cerramientos para generar la roza de paso. Los pasamuros son más sencillos de sellar y de asegurar su estanqueidad que una roza ya que, al realizar ésta, se generan fisuras por muchos puntos en la tabiquería por los que puede pasar el aire empeorando la hermeticidad.

La Fig. 5.8 muestra un detalle de la práctica habitual mediante roza y la mejora propuesta mediante pasamuros.



Figura 5.8: Tratamiento previo propuesto para el paso de instalaciones. Superior práctica habitual. Inferior mejora propuesta con pasamuros de PVC y sellado posterior.

La Fig. 5.9 muestra detalles de la mejora «M1 - Mejora básica» para el sellado del paso de instalaciones, con enlucido de yeso o espuma de poliuretano.



Figura 5.9: M1 Mejora básica. Sellado del paso de instalaciones. Superior sellado con enlucido de yeso. Inferior sellado con espuma de poliuretano.

La Fig. 5.10 muestra detalles de la mejora «M2 - Mejora avanzada» para el perímetro de ventanas.



Figura 5.10: M2 Mejora avanzada. Colocación de cinta precomprimida y membrana líquida de hermeticidad aplicada en el marco.

La Fig. 5.11 muestra detalles de la mejora «M2 - Mejora avanzada» para el paso de instalaciones.



Figura 5.11: M2 Mejora avanzada. Láminas de sellado (superior) o membrana líquida en las zonas de paso de instalaciones (inferior).

5.4 Comparación entre práctica habitual y mejoras propuestas. Resumen

La Tabla 10 muestra un resumen las mejoras propuestas, comparadas con la práctica habitual en edificios de nueva construcción en España.

Tabla 10. Comparación entre práctica habitual y diferentes técnicas de mejora de la hermeticidad al aire

Zona	Práctica habitual	M1 - Mejora básica	M2 - Mejora avanzada
Puntos de paso de las instalaciones	Sin tratamiento	Relleno de orificios con enlucido de yeso o espuma de poliuretano	Relleno de orificios con espuma flexible de poliuretano y membrana líquida o láminas de sellado
Perímetro de ventanas	Espuma de poliuretano	Espuma de poliuretano y enlucido de yeso	Cintas precomprimidas de poliuretano, espuma flexible de poliuretano y membrana líquida

5.5 Modelo del edificio para simulación energética

Para realizar la simulación energética se ha empleado el motor de cálculo EnergyPlus versión 9.1. EnergyPlus [35] siguiendo los mismos criterios indicados en el apartado 4.5 del **Capítulo 4 Materiales y métodos. Mejora constructiva de puentes térmicos lineales de frentes de forjado.**

Para realizar el modelo geométrico de edificio y lanzar EnergyPlus [35] se ha empleado la herramienta CYPETHERM HE Plus [44].

EnergyPlus [35], para llevar a cabo el cálculo energético, utiliza el caudal de aire por infiltraciones a una presión de 1 Pa.

Sin embargo, el valor obtenido mediante el ensayo Blower Door se encuentra a 50 Pa. CYPETHERM HE Plus [44] realiza la conversión del caudal de aire de 50 Pa a 1 Pa utilizando para ello la Eq. (7) obtenida de la norma EN 15242 [47] que ha sido sustituida por la norma EN 16798-7 [48] y en la que también aparece una ecuación similar.

$$C_{inf} = q_v \left(\frac{1}{50} \right)^{0,67} \quad (7)$$

Donde C_{inf} es el caudal de fuga de aire para una presión de 1 Pa y q_v es el caudal de fuga de aire para una presión de 50 Pa.

CYPETHERM HE Plus [44] suma el caudal de fuga de aire obtenido de la Eq. (7) al caudal de ventilación definido para mantener las condiciones de calidad del aire interior, enviando el resultado al motor de cálculo energético EnergyPlus [35].

CAPÍTULO 6
DISCUSIÓN DE RESULTADOS. MEJORA DE PUENTES
TÉRMICOS LINEALES DE FRENTES DE FORJADO

Capítulo 6. Resultados. Mejora de puentes térmicos lineales de frentes de forjado

Mediante el estudio sobre los puentes térmicos en edificios de viviendas, se ha podido caracterizar su comportamiento y proponer mejoras constructivas con el objetivo de reducir su impacto, en términos de reducción de la demanda energética.

Además, se ha podido analizar cómo afectan los puentes térmicos en los indicadores de eficiencia energética de los edificios de viviendas NZEB y también, estudiar el sobrecoste de construcción por cada tonelada de CO₂ ahorrada.

Los principales resultados y contribuciones realizadas durante el desarrollo de esta investigación se analizan y discuten con detalle en el apartado 5 *Comparison and discussion of results* de la publicación [6] que constituye esta tesis incluido en el **Anexo Separata de artículos**.

A continuación se facilita un resumen de los resultados obtenidos.

6.1 Resultados de transmitancia térmica lineal

En todas las tablas de resultados que se muestran a continuación:

- El criterio de selección de los valores de transmitancia térmica U de la fachada ha quedado descrito en el apartado 4.2 del **Capítulo 4. Materiales y métodos. Mejora constructiva de puentes térmicos lineales de frentes de forjado**.
- El valor Ra representa la resistencia térmica del aislamiento térmico de la fachada, considerando una conductividad térmica de 0,034 W/m·K y un espesor conforme a la Tabla 3 del **Capítulo 4. Materiales y métodos. Mejora constructiva de puentes térmicos lineales de frentes de forjado** en función del valor U de la fachada.
- La definición (nomenclatura) de cada uno de los símbolos indicados se corresponde con lo expresado en el **Listado de abreviaturas, símbolos y letras griegas**.

6.1.1 Fachadas con hoja exterior caravista

Caso base: fachadas caravista en situación sin mejorar

En la Tabla 11 se facilitan los resultados tanto del flujo de calor por metro lineal de puente térmico como su transmitancia térmica lineal.

Los casos se muestran clasificados en función del valor de transmitancia térmica (valor U) de las fachadas y del tipo de forjado (FR para forjados reticulares; FUC para forjados unidireccionales con bovedilla cerámica; FUE forjados unidireccionales con bovedilla de EPS).

Tabla 11. Fachadas caravista. Caso base. Resultados del análisis del flujo de calor

CASO BASE			Dimensiones interiores			Dimensiones exteriores		
Caso	Fachada		Φ_I (W/m)	L^{2D} W/(m·K)	Ψ_i W/(m·K)	Φ_e (W/m)	L^{2D} W/(m·K)	Ψ_e W/(m·K)
	Valor U W/m ² ·K	Ra m ² ·K/W						
FR 40	0,40	2,00	35,69	1,78	1,01	35,69	1,78	0,86
FR 35	0,35	2,36	33,47	1,67	1,00	33,48	1,67	0,87
FR 30	0,30	2,83	30,99	1,55	0,97	31,00	1,55	0,86
FR 25	0,25	3,50	28,33	1,42	0,94	28,33	1,42	0,84
FR 20	0,20	4,50	25,22	1,26	0,87	25,22	1,26	0,80
FR 15	0,15	6,16	21,38	1,07	0,78	21,38	1,07	0,72
FUC 40	0,40	2,00	33,63	1,68	0,91	33,63	1,68	0,76
FUC 35	0,35	2,36	31,25	1,56	0,89	31,25	1,56	0,76
FUC 30	0,30	2,83	28,70	1,43	0,86	28,70	1,43	0,74
FUC 25	0,25	3,50	25,90	1,30	0,81	25,90	1,30	0,72
FUC 20	0,20	4,50	22,50	1,13	0,74	22,50	1,13	0,72
FUC 15	0,15	6,16	18,62	0,93	0,64	18,62	0,93	0,59
FUE 40	0,40	2,00	29,95	1,50	0,73	29,95	1,50	0,58
FUE 35	0,35	2,36	27,37	1,37	0,69	27,37	1,37	0,56
FUE 30	0,30	2,83	24,62	1,23	0,65	24,62	1,23	0,54
FUE 25	0,25	3,50	21,64	1,08	0,60	21,64	1,08	0,51
FUE 20	0,20	4,50	17,35	0,87	0,48	17,36	0,87	0,41
FUE 15	0,15	6,16	13,77	0,69	0,40	13,77	0,69	0,34

Nota.- El valor numérico indicado en cada caso representa el valor U de la fachada. Con fondo verde los valores de transmitancia térmica lineal interior que están por debajo de 0,60 W/m·K

La Fig. 6.1 muestra gráficamente la variación de la transmitancia térmica lineal, tanto interior como exterior, en función del tipo de forjado y del valor U de la fachada.

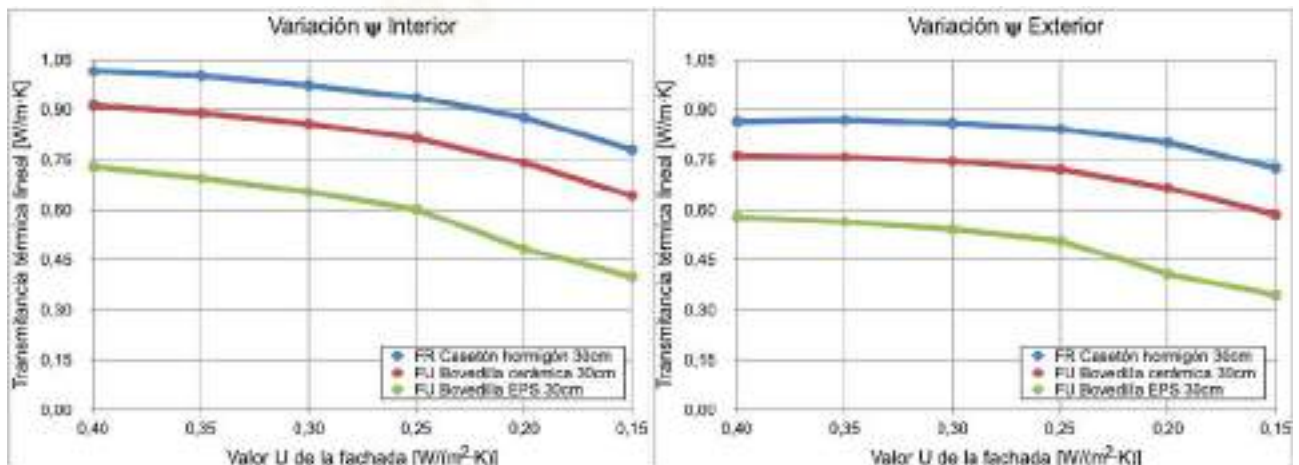


Figura 6.1: Caso base fachadas caravista. Variación de la transmitancia térmica lineal interior y exterior.

El análisis de los resultados indicados en la Tabla 11 muestra que el tipo de aligeramiento de los forjados influye en la reducción del flujo de calor. Forjados con aligeramientos de hormigón generarán un mayor flujo de calor. En los aligeramientos de EPS el flujo de calor es menor y esta reducción es más significativa cuando el aligeramiento de EPS toca el aislamiento térmico de la fachada ya que se produce una continuidad en las capas aislantes reduciendo las zonas no aisladas.

Esto se aprecia en la Fig. 6.2 donde se comparan las zonas con la misma magnitud del flujo de calor manteniendo el valor de transmitancia térmica de la fachada (valor U 0,15 $W/m^2 \cdot K$) con los tres tipos de forjado (FR 15 forjado reticular con casetón de hormigón; FU 15 forjado unidireccional con bovedilla cerámica; FUC 15 forjado unidireccional con bovedilla de EPS).

Se aprecia claramente como, en el caso FUE 15 la primera línea de aligeramientos toca el aislamiento de la fachada y desplaza el flujo de calor hacia la capa de compresión del forjado a través de la primera línea de viguetas del forjado.

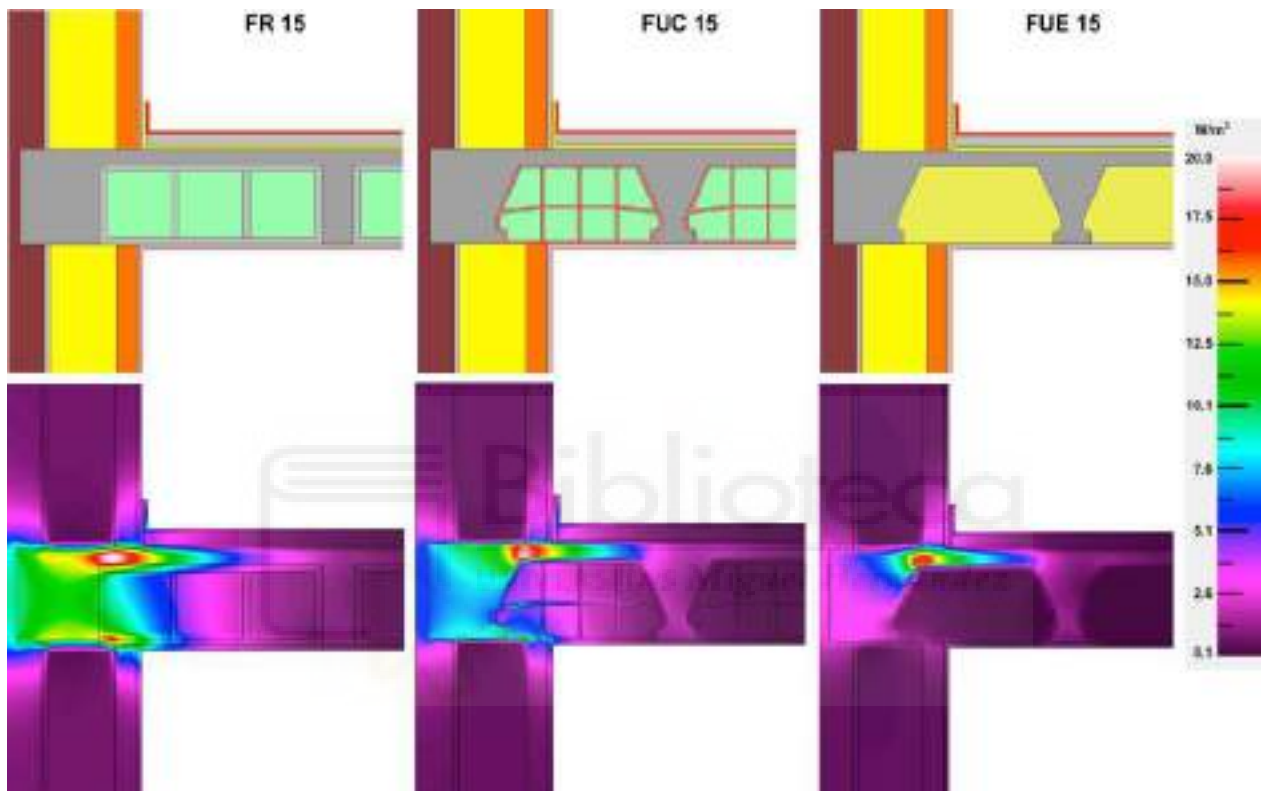


Figura 6.2: Comparación de las zonas con la misma magnitud del flujo de calor para los tres forjados analizados con el mismo valor U de fachada

El análisis anterior es la base utilizada para diseñar medidas de mejora. El diseño planteado con las mejoras busca dar continuidad a la capa de aislamiento térmico en la zona del frente de forjado.

Los resultados obtenidos, mostrados en la Tabla 11, muestran que, tanto el forjado con casetones de hormigón como el de bovedillas cerámicas, superan el valor de máximo buscado en esta investigación, de 0,60 $W/m \cdot K$ para la transmitancia térmica lineal interior.

Sólo hay dos casos (FUE 20 y FUE 15) en los que el valor de transmitancia térmica lineal está por debajo del valor máximo establecido en esta investigación y eso se debe a que la bovedilla de EPS toda el aislamiento térmico de la fachada y se produce una reducción de las zonas sin continuidad de aislamiento térmico.

Caso mejora M1: caravista autoportante con apoyo no aislado

En la Tabla 12 se facilitan los resultados tanto de flujo de calor por metro lineal de puente térmico como su transmitancia térmica lineal.

Tabla 12. Fachadas caravista. Caso Mejora M1. Resultados del análisis del flujo de calor

CASO MEJORA 1 (M1)			Dimensiones interiores				Dimensiones exteriores			
Caso	Fachada		Φ_i (W/m)	L^{2D} W/(m·K)	Ψ_i W/(m·K)	%	Φ_e (W/m)	L^{2D} W/(m·K)	Ψ_e W/(m·K)	%
	Valor U W/m ² ·K	Ra m ² ·K/W								
FR 40	0,40	2,00	25,34	1,27	0,50	51,0	25,34	1,27	0,35	59,9
FR 35	0,35	2,36	23,29	1,16	0,49	50,9	23,30	1,16	0,36	58,6
FR 30	0,30	2,83	21,49	1,07	0,50	48,9	21,49	1,07	0,38	55,3
FR 25	0,25	3,50	19,51	0,98	0,49	47,2	19,51	0,98	0,40	52,4
FR 20	0,20	4,50	17,41	0,87	0,49	44,6	17,41	0,87	0,41	48,8
FR 15	0,15	6,16	15,09	0,75	0,47	40,3	15,09	0,75	0,41	43,5
FUC 40	0,40	2,00	25,09	1,25	0,48	46,9	25,09	1,25	0,33	56,1
FUC 35	0,35	2,36	23,04	1,15	0,48	46,2	23,04	1,15	0,35	54,2
FUC 30	0,30	2,83	21,07	1,05	0,48	44,5	21,06	1,05	0,36	51,3
FUC 25	0,25	3,50	19,18	0,96	0,48	41,3	19,18	0,96	0,38	46,7
FUC 20	0,20	4,50	17,01	0,85	0,47	37,1	17,01	0,85	0,39	41,3
FUC 15	0,15	6,16	14,61	0,73	0,44	31,2	14,61	0,73	0,39	34,2
FUE 40	0,40	2,00	24,64	1,23	0,46	36,5	24,64	1,23	0,31	46,0
FUE 35	0,35	2,36	22,56	1,13	0,45	34,7	22,56	1,13	0,32	42,7
FUE 30	0,30	2,83	20,54	1,03	0,45	31,2	20,54	1,03	0,34	37,7
FUE 25	0,25	3,50	18,57	0,93	0,45	25,5	18,57	0,93	0,35	30,3
FUE 20	0,20	4,50	16,23	0,81	0,43	11,6	16,24	0,81	0,35	13,7
FUE 15	0,15	6,16	13,46	0,67	0,38	3,9	13,46	0,67	0,33	4,5

Nota.- El valor numérico indicado en cada caso representa el valor U de la fachada. Con fondo verde los valores de transmitancia térmica lineal interior que están por debajo de 0,60 W/m·K. La columna % indica la mejora respecto del caso base en términos de reducción de la transmitancia térmica lineal.

La Fig. 6.3 muestra gráficamente la variación de la transmitancia térmica lineal, tanto interior como exterior, en función del tipo de forjado y del valor U de la fachada.

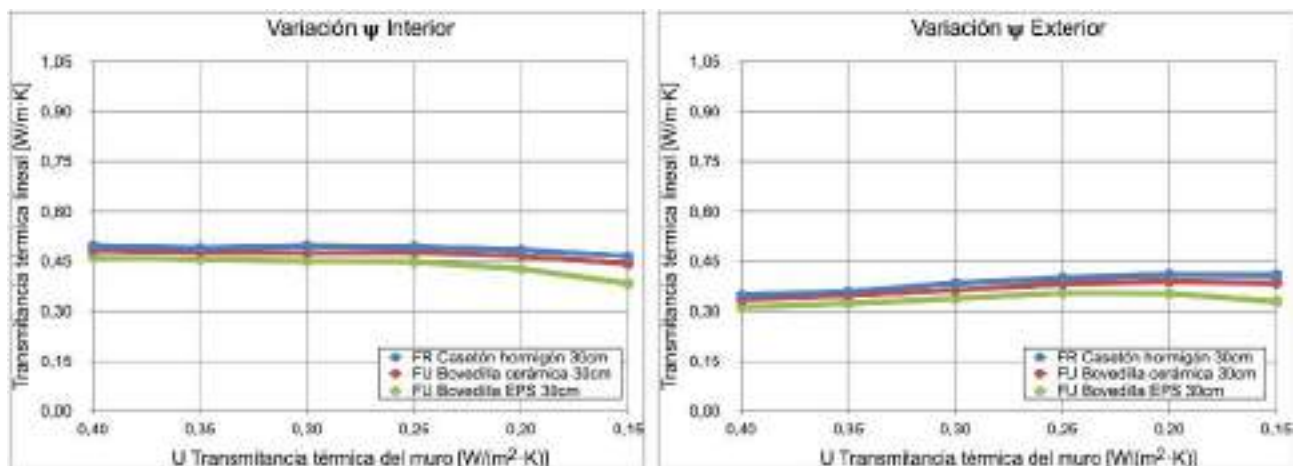


Figura 6.3: Caso Mejora M1. Variación de la transmitancia térmica lineal interior y exterior.

Como se aprecia en las gráficas de la Fig. 6.3, con esta mejora desaparece el efecto del tipo de forjado en el valor de la transmitancia térmica lineal, excepto en los casos con forjado unidireccional con bovedilla de EPS y valor U de fachada inferior a $0,20 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ ya que, en ese caso, el aislamiento térmico de la fachada toca el elemento aligerante del forjado, formado también por un material aislante térmico. En todos los casos, el valor de transmitancia térmica lineal interior se encuentra muy por debajo del valor máximo considerado de $0,60 \text{ W/m}\cdot\text{K}$.

Al disponer de una capa de aislamiento térmico en la fachada prácticamente continua, se puede pensar que el resultado será la eliminación del puente térmico, pero el análisis realizado ha demostrado que no es así y eso se debe a la existencia de un perfil de acero inoxidable para el apoyo de la hoja exterior caravista y anclado al frente de forjado.

La Fig. 6.4 muestra un detalle del frente de forjado y las zonas con la misma magnitud del flujo de calor para el caso FR15. Se aprecia claramente el incremento del flujo de calor en la zona del perfil de acero inoxidable y eso que dicho perfil tan solo tiene 4 mm de espesor.

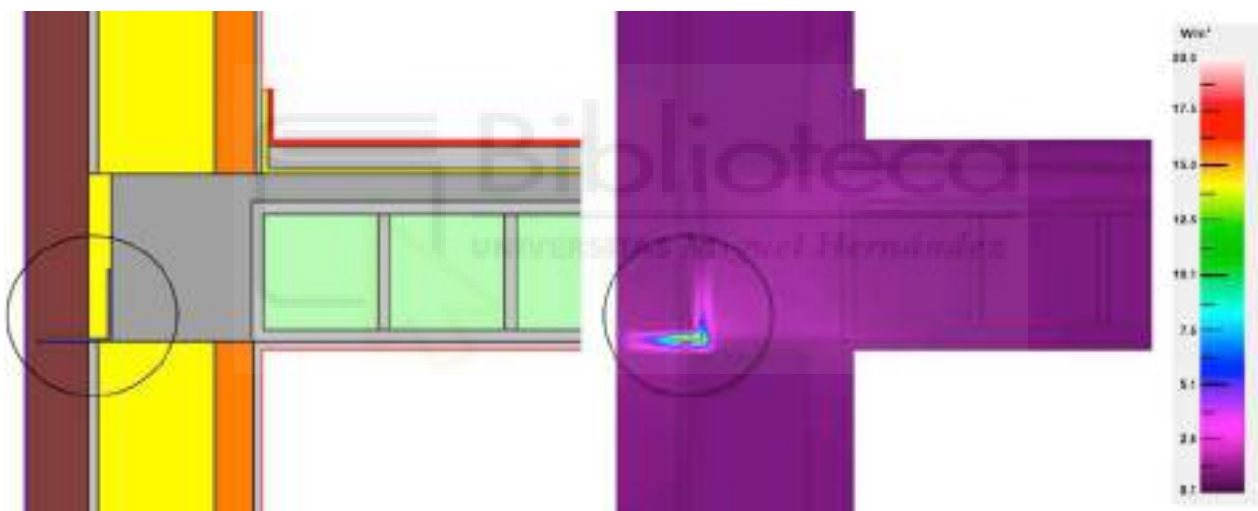


Figura 6.4: Zonas con la misma magnitud de flujo de calor. Detalle del perfil de acero inoxidable para el caso M1 FR 15 (izquierda: modelo con materiales. Derecha: modelo con zonas con mismo flujo de calor).

Para profundizar aún más en el efecto del perfil de acero inoxidable, se ha realizado una comparativa del caso FR15 con y sin perfil. El flujo de calor pasa de $15,09 \text{ W/m}$, para el caso con perfil, a $10,57 \text{ W/m}$ para el caso sin perfil, lo que supone una diferencia del 30%. Esto demuestra que para reducir el flujo de calor en este tipo fachadas caravista, se debe actuar sobre el perfil de acero inoxidable de apoyo de dicha hoja cerámica.

También se ha realizado, para el caso FR15 con perfil de acero inoxidable, un análisis de la variación del flujo de calor al incrementar el espesor de aislamiento térmico en el frente de forjado. La Tabla 13 muestra dicho análisis en el que se puede apreciar que la disminución en el flujo de calor es muy reducida debido a que, al incrementar el espesor de aislamiento térmico en el frente de forjado, se necesita emplear perfiles de acero inoxidable de mayor tamaño y espesor, lo que incrementará el efecto mostrado en la Fig. 6.4.

Tabla 13. Dependencia del flujo de calor con el espesor del aislamiento térmico en el frente de forjado para el caso M1 FR15.

		Dimensiones interiores			Dimensiones exteriores		
Caso	Espesor del aislamiento térmico en el frente de forjado [mm]	Φ_i (W/m)	L^{2D} W/(m·K)	Ψ_i W/(m·K)	Φ_e (W/m)	L^{2D} W/(m·K)	Ψ_e W/(m·K)
FR 15	40 caso original	15,09	0,75	0,47	15,09	0,75	0,41
	60	14,11	0,71	0,42	14,11	0,71	0,36
	80	13,34	0,67	0,38	13,34	0,67	0,32

Caso mejora M2: caravista autoportante con apoyo aislado

Una solución para reducir el efecto del perfil de acero inoxidable indicado en la mejora M1, puede pasar por emplear perfiles no metálicos pero no hay soluciones para ello en el mercado, ya que puede comprometer la estabilidad mecánica de la fachada. Por tanto, la solución considerada aquí pasa por introducir un aislamiento térmico rígido (tipo neopreno o similar) entre dicho perfil y el frente de forjado, algo similar al efecto «rotura de puente térmico» que existe en los marcos metálicos de las ventanas.

En la Tabla 14 se facilitan los resultados de flujo de calor por metro lineal de puente térmico y de transmitancia térmica lineal. En todos los casos, el valor de transmitancia térmica lineal interior se encuentra muy por debajo del valor máximo considerado de 0,60 W/m·K.

Tabla 14. Fachadas caravista. Caso Mejora M2. Resultados del análisis del flujo de calor

CASO MEJORA 2 (M2)			Dimensiones interiores				Dimensiones exteriores			
Caso	Fachada		Φ_i (W/m)	L^{2D} W/(m·K)	Ψ_i W/(m·K)	%	Φ_e (W/m)	L^{2D} W/(m·K)	Ψ_e W/(m·K)	%
	Valor U W/m ² ·K	Ra m ² ·K/W								
FR 40	0,40	2,00	22,83	1,14	0,37	63,4	22,84	1,14	0,22	74,4
FR 35	0,35	2,36	21,01	1,05	0,38	62,4	21,01	1,05	0,25	71,8
FR 30	0,30	2,83	19,09	0,95	0,38	61,2	19,09	0,95	0,26	69,3
FR 25	0,25	3,50	17,19	0,86	0,38	59,6	17,19	0,86	0,28	66,2
FR 20	0,20	4,50	15,21	0,76	0,38	57,1	15,22	0,76	0,30	62,5
FR 15	0,15	6,16	13,11	0,66	0,37	53,0	13,11	0,66	0,31	57,1
FUC 40	0,40	2,00	22,68	1,13	0,36	60,1	22,68	1,13	0,21	71,9
FUC 35	0,35	2,36	20,84	1,04	0,37	58,6	20,84	1,04	0,24	68,7
FUC 30	0,30	2,83	18,93	0,95	0,37	57,0	18,93	0,95	0,26	65,6
FUC 25	0,25	3,50	16,99	0,85	0,37	54,8	16,99	0,85	0,27	61,9
FUC 20	0,20	4,50	14,96	,748	0,36	50,9	14,96	0,75	0,29	56,7
FUC 15	0,15	6,16	12,87	0,64	0,35	44,8	12,87	0,64	0,30	49,1
FUE 40	0,40	2,00	22,40	1,12	0,35	51,9	22,40	1,12	0,20	65,4
FUE 35	0,35	2,36	20,53	1,03	0,35	49,2	20,53	1,03	0,22	60,7
FUE 30	0,30	2,83	18,59	0,93	0,35	46,1	18,59	0,93	0,24	55,7
FUE 25	0,25	3,50	16,59	0,83	0,35	42,0	16,59	0,83	0,25	49,8
FUE 20	0,20	4,50	14,46	0,72	0,34	30,0	14,46	0,72	0,26	35,5
FUE 15	0,15	6,16	12,10	0,60	0,32	21,0	12,10	0,60	0,26	24,4

Nota.- El valor numérico indicado en cada caso representa el valor U de la fachada. Con fondo verde los valores de transmitancia térmica lineal interior que están por debajo de 0,60 W/m·K. La columna % indica la mejora respecto del caso base en términos de reducción de la transmitancia térmica lineal.

La Fig. 6.5 muestra gráficamente la variación de la transmitancia térmica lineal, tanto interior como exterior, en función del tipo de forjado y del valor U de la fachada.

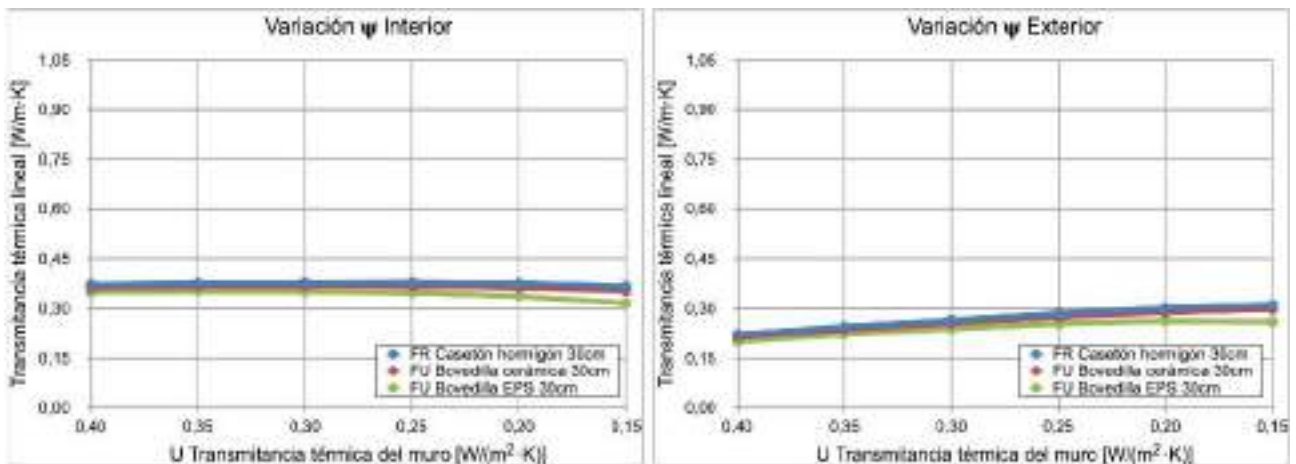


Figura 6.5: Caso Mejora M2. Variación de la transmitancia térmica lineal interior y exterior.

Caso mejora M3: caravista confinada entre forjados

La Tabla 15 muestra los resultados de flujo de calor por metro lineal de puente térmico y el valor de la transmitancia térmica lineal.

Tabla 15. Fachadas caravista. Caso Mejora M3. Resultados del análisis del flujo de calor

CASO MEJORA 3 (M3)			Dimensiones interiores				Dimensiones exteriores			
Caso	Fachada		Φ_i (W/m)	L^{2D} W/(m·K)	Ψ_i W/(m·K)	%	Φ_e (W/m)	L^{2D} W/(m·K)	Ψ_e W/(m·K)	%
	Valor U W/m²·K	Ra m²·K/W								
FR 40	0,40	2,00	26,31	1,32	0,55	45,4	26,32	1,32	0,40	54,2
FR 35	0,35	2,36	23,68	1,18	0,52	48,3	23,68	1,18	0,38	56,4
FR 30	0,30	2,83	19,78	0,99	0,42	57,1	19,78	0,99	0,30	65,3
FR 25	0,25	3,50	17,15	0,86	0,38	59,3	17,15	0,86	0,28	66,5
FR 20	0,20	4,50	14,53	0,73	0,35	60,5	14,54	0,73	0,27	66,7
FR 15	0,15	6,16	11,76	0,59	0,30	61,3	11,76	0,59	0,24	66,5
FUC 40	0,40	2,00	25,66	1,28	0,52	42,9	25,66	1,28	0,36	52,3
FUC 35	0,35	2,36	22,23	1,11	0,44	50,0	22,23	1,11	0,31	59,4
FUC 30	0,30	2,83	19,76	0,99	0,42	51,4	19,76	0,99	0,30	60,0
FUC 25	0,25	3,50	17,38	0,87	0,39	51,7	17,38	0,87	0,29	59,2
FUC 20	0,20	4,50	14,88	0,74	0,36	50,9	14,88	0,74	0,28	57,3
FUC 15	0,15	6,16	12,17	0,61	0,32	49,7	12,17	0,61	0,26	55,0
FUE 40	0,40	2,00	25,62	1,28	0,52	28,7	25,62	1,28	0,36	37,5
FUE 35	0,35	2,36	22,19	1,11	0,44	36,3	22,19	1,11	0,30	46,0
FUE 30	0,30	2,83	19,72	0,99	0,41	36,6	19,72	0,99	0,30	45,3
FUE 25	0,25	3,50	17,33	0,87	0,39	35,0	17,33	0,87	0,29	42,4
FUE 20	0,20	4,50	14,83	0,74	0,36	25,3	14,83	0,74	0,28	31,0
FUE 15	0,15	6,16	12,12	0,61	0,32	20,0	12,12	0,61	0,26	24,1

Nota.- El valor numérico indicado en cada caso representa el valor U de la fachada. Con fondo verde los valores de transmitancia térmica lineal interior que están por debajo de 0,60 W/m·K. La columna % indica la mejora respecto del caso base en términos de reducción de la transmitancia térmica lineal.

En todos los casos el valor de transmitancia térmica lineal interior se encuentra por debajo del valor máximo definido en esta investigación, 0,60 W/m·K.

La Fig. 6.6 muestra gráficamente la variación de la transmitancia térmica lineal, tanto interior como exterior, en función del tipo de forjado y del valor U de la fachada.

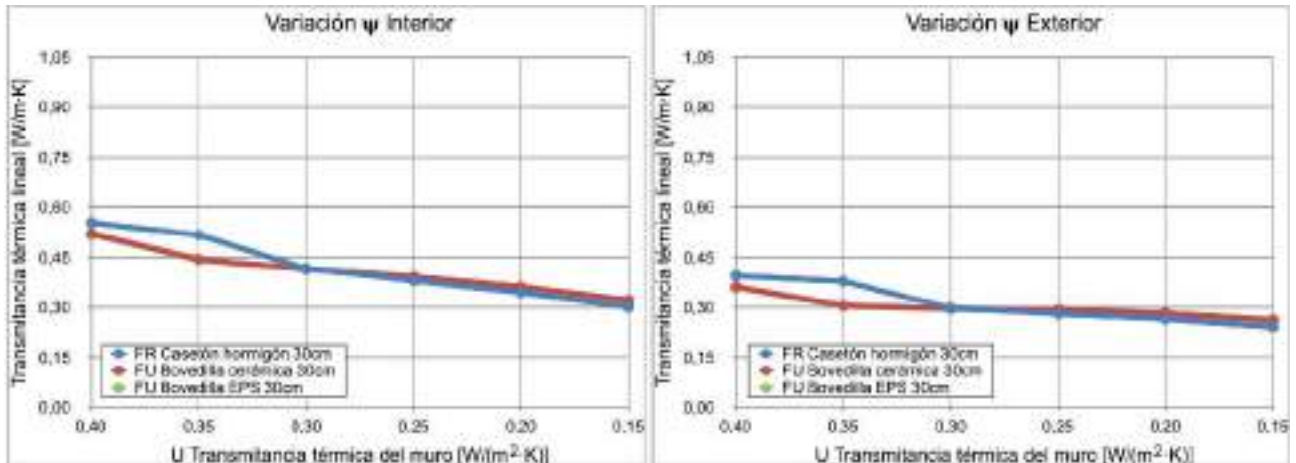


Figura 6.6: Caso Mejora M3. Variación de la transmitancia térmica lineal interior y exterior.

La disposición de los materiales empleados en esta mejora hace que el flujo de calor se desplace hacia la capa de compresión del forjado.

Para analizar la posible mejora del incremento del ancho de la placa de aislamiento térmico perimetral situada bajo el pavimento, se ha realizado el análisis que se muestra en la Tabla 16 en la que se aprecia que hay una reducción significativa al colocar una placa de 50cm de ancho, pero que el incremento de dicho ancho genera un efecto muy reducido (pasar de 50cm a 100cm sólo reduce la transmitancia térmica lineal interior en un 0,29% y la exterior en un 0,36% respecto al caso sin esa placa de aislamiento térmico perimetral), por ello no resulta interesante incrementar el ancho de dicha placa de aislamiento térmico.

Tabla 16. Influencia del ancho del aislamiento térmico bajo el pavimento sobre el caso M3 FR 15

Ancho banda aislamiento térmico bajo el pavimento - cm	ψ_i W/(m·K)		ψ_e W/(m·K)	
	0	0,342		0,283
50	0,302	-11,70 %	0,243	-14,13 %
100	0,301	-11,99 %	0,242	-14,49 %

La Fig. 6.7 muestra la disposición de la placa de aislamiento térmico de 30mm de espesor, situada bajo el pavimento (color amarillo). Izquierda sin aislamiento térmico bajo el pavimento, centro con una placa de 50cm de ancho y derecha con una placa de 100cm de ancho.

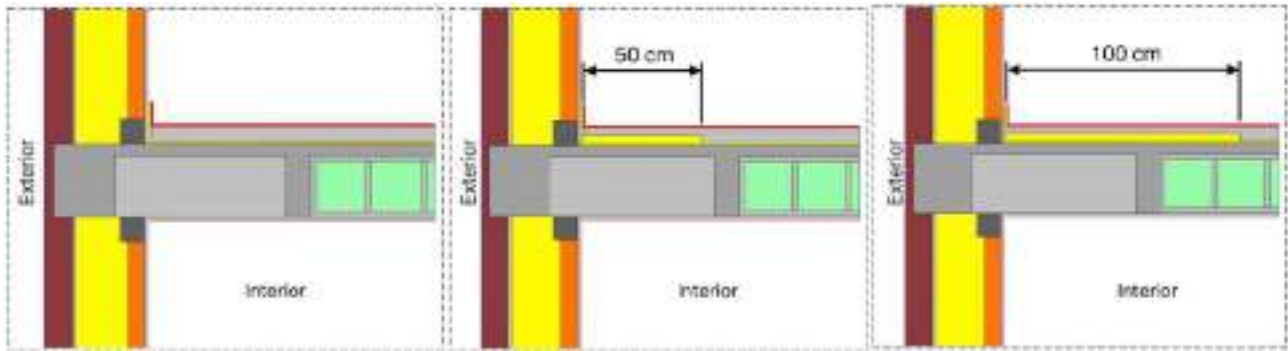


Figura 6.7: Esquema de los casos considerados para analizar el efecto del aislamiento térmico bajo el pavimento.

6.1.2 Fachadas con acabado exterior monocapa

Caso base: fachadas monocapa en situación sin mejorar

En la Tabla 17 se facilitan los resultados tanto de flujo del calor por metro lineal de puente térmico como su transmitancia térmica lineal.

Tabla 17. Fachadas monocapa. Caso base. Resultados del análisis del flujo de calor

CASO BASE			Dimensiones interiores			Dimensiones exteriores		
Caso	Fachada		Φ_i (W/m)	L^{2D} W/(m·K)	Ψ_i W/(m·K)	Φ_e (W/m)	L^{2D} W/(m·K)	Ψ_e W/(m·K)
	Valor U W/m ² ·K	Ra m ² ·K/W						
FR 40	0,40	2,00	35,99	1,80	1,03	35,99	1,80	0,88
FR 35	0,35	2,36	33,70	1,69	1,01	33,70	1,69	0,88
FR 30	0,30	2,83	31,24	1,56	0,98	31,24	1,56	0,87
FR 25	0,25	3,50	28,49	1,43	0,94	28,49	1,43	0,85
FR 20	0,20	4,50	25,30	1,27	0,88	25,30	1,27	0,81
FR 15	0,15	6,16	21,53	1,08	0,79	21,53	1,08	0,73
FUC 40	0,40	2,00	33,41	1,67	0,90	33,41	1,67	0,75
FUC 35	0,35	2,36	31,07	1,55	0,88	31,07	1,55	0,75
FUC 30	0,30	2,83	28,52	1,43	0,85	28,52	1,43	0,74
FUC 25	0,25	3,50	25,64	1,28	0,80	25,64	1,28	0,71
FUC 20	0,20	4,50	22,30	1,12	0,73	22,30	1,12	0,66
FUC 15	0,15	6,16	18,52	0,93	0,64	18,52	0,93	0,66
FUE 40	0,40	2,00	28,93	1,45	0,68	28,93	1,45	0,53
FUE 35	0,35	2,36	26,53	1,33	0,65	26,53	1,33	0,52
FUE 30	0,30	2,83	23,86	1,19	0,62	23,86	1,19	0,50
FUE 25	0,25	3,50	20,15	1,01	0,53	20,15	1,01	0,43
FUE 20	0,20	4,50	16,76	0,84	0,45	16,76	0,84	0,38
FUE 15	0,15	6,16	13,47	0,67	0,39	13,47	0,67	0,33

Nota.- El valor numérico indicado en cada caso representa el valor U de la fachada. Con fondo verde los valores de transmitancia térmica lineal interior que están por debajo de 0,60 W/m·K.

La Fig. 6.8 muestra gráficamente la variación de la transmitancia térmica lineal, tanto interior como exterior, en función del tipo de forjado y del valor U de la fachada.

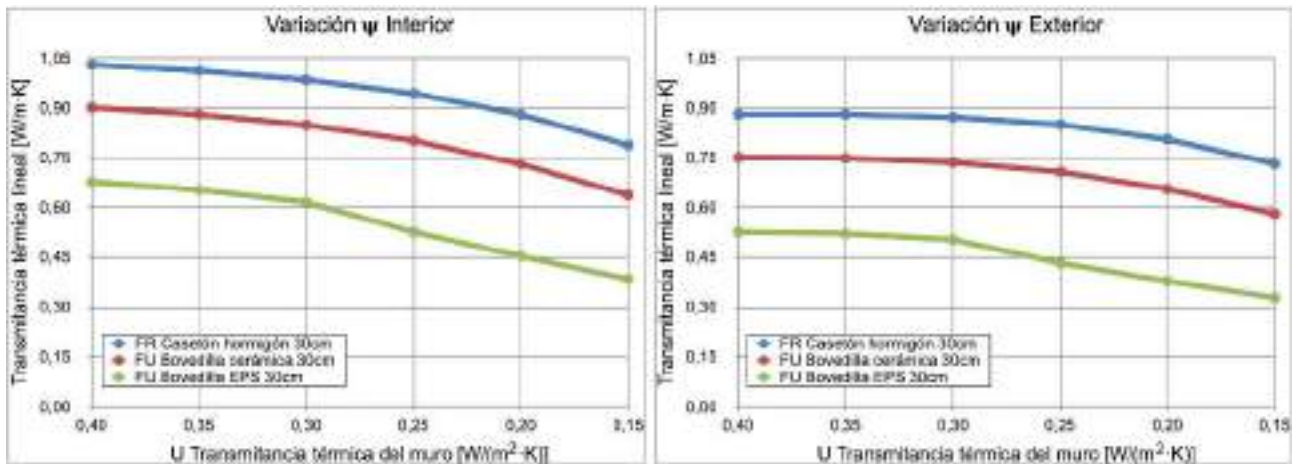


Figura 6.8: Caso Base fachadas monocapa. Variación de la transmitancia térmica lineal interior y exterior.

Al igual que sucede en el caso base de las fachadas caravista, el tipo de aligeramiento empleado en el forjado influye en el valor del flujo de calor y, por tanto, en el valor de la transmitancia térmica lineal.

Los forjados con aligeramientos de EPS son los que presentan un menor flujo de calor.

Sólo hay tres casos que cumplen el criterio buscado en esta tesis (transmitancia térmica lineal interior inferior a 0,60 W/m·K): FUE25, FUE20 y FUE15.

Todos ellos son forjados con aligeramientos de EPS, en los que, por la disposición de los materiales de la fachada y el espesor de su aislamiento térmico, éste llega a tocar el elemento aligerante del forjado, reduciendo las zonas que no tienen aislamiento térmico.

La Fig. 6.9 muestra un detalle de los forjados FUE25, FUE20 y FUE15 en los que se aprecia la conexión entre el aislamiento térmico de la fachada con el elemento aligerante de EPS del forjado.

En los tres casos, el mayor flujo de calor se produce a través de la primera líneas de viguetas, para pasar a la capa de compresión del forjado y después al frente de forjado.

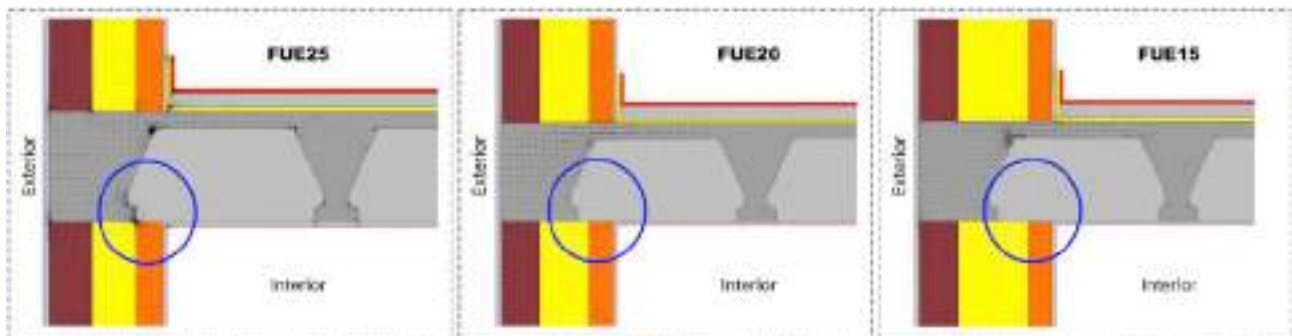


Figura 6.9: Detalle de los casos FUE25, FUE20 y FUE15 donde se aprecia la conexión entre el aislamiento térmico de la fachada y el aligeramiento de EPS (remarcada en azul).

Caso mejora M4: continuidad por la hoja cerámica exterior

En la Tabla 18 se facilitan los resultados tanto de flujo del calor por metro lineal de puente térmico como su transmitancia térmica lineal.

Tabla 18. Fachadas monocapa. Caso Mejora M4. Resultados del análisis del flujo de calor

CASO MEJORA 4 (M4)			Dimensiones interiores				Dimensiones exteriores			
Caso	Fachada		Φ_i (W/m)	L^{2D} W/(m·K)	Ψ_i W/(m·K)	%	Φ_e (W/m)	L^{2D} W/(m·K)	Ψ_e W/(m·K)	%
	Valor U W/m ² ·K	Ra m ² ·K/W								
FR 40	0,40	2,00	20,46	1,02	0,25	75,4	20,46	1,02	0,10	88,3
FR 35	0,35	2,36	18,69	0,93	0,26	74,2	18,69	0,93	0,13	85,3
FR 30	0,30	2,83	16,90	0,85	0,27	72,8	16,90	0,85	0,16	82,2
FR 25	0,25	3,50	15,08	0,75	0,27	71,1	15,08	0,75	0,18	78,9
FR 20	0,20	4,50	13,21	0,66	0,28	68,7	13,21	0,66	0,20	75,1
FR 15	0,15	6,16	11,25	0,56	0,27	65,2	11,25	0,56	0,22	70,4
FUC 40	0,40	2,00	20,28	1,01	0,24	72,9	20,28	1,01	0,09	87,5
FUC 35	0,35	2,36	18,49	0,92	0,25	71,5	18,49	0,92	0,12	84,1
FUC 30	0,30	2,83	16,68	0,83	0,26	69,8	16,68	0,83	0,14	80,4
FUC 25	0,25	3,50	14,83	0,74	0,26	67,5	14,83	0,74	0,17	76,4
FUC 20	0,20	4,50	12,91	0,65	0,26	64,3	12,91	0,65	0,19	71,7
FUC 15	0,15	6,16	10,85	0,54	0,25	60,1	10,85	0,54	0,20	69,8
FUE 40	0,40	2,00	19,89	0,99	0,22	66,9	19,89	0,99	0,08	85,8
FUE 35	0,35	2,36	18,06	0,90	0,23	64,9	18,06	0,90	0,10	81,2
FUE 30	0,30	2,83	16,19	0,81	0,23	62,3	16,19	0,81	0,12	76,1
FUE 25	0,25	3,50	14,28	0,71	0,23	55,8	14,28	0,71	0,14	67,9
FUE 20	0,20	4,50	12,21	0,61	0,23	50,2	12,21	0,61	0,15	60,2
FUE 15	0,15	6,16	9,84	0,49	0,20	47,3	9,84	0,49	0,15	55,2

Nota.- El valor numérico indicado en cada caso representa el valor U de la fachada. Con fondo verde los valores de transmitancia térmica lineal interior que están por debajo de 0,60 W/m·K. La columna % indica la mejora respecto del caso base en términos de reducción de la transmitancia térmica lineal.

La Fig. 6.10 muestra gráficamente la variación de la transmitancia térmica lineal, tanto interior como exterior, en función del tipo de forjado y del valor U de la fachada. En todos los casos, el valor de la transmitancia térmica lineal interior es inferior al límite establecido en esta tesis (0,60 W/m·K).

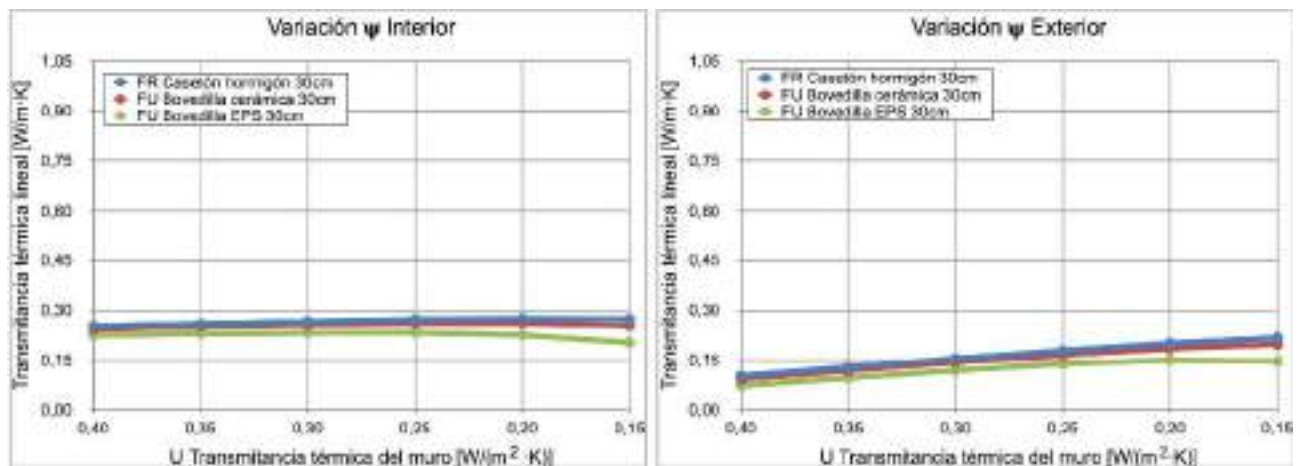


Figura 6.10: Caso Mejora M4. Variación de la transmitancia térmica lineal interior y exterior.

6.2 Comparación con valores oficiales o de referencia

La norma [8] o el estudio [48] indican los métodos para determinar el valor de la transmitancia térmica lineal y su precisión típica:

- Cálculos numéricos conforme a EN ISO 10211 [7], con una precisión típica del $\pm 5\%$;
- Los catálogos de puentes térmicos, con una precisión típica del $\pm 20\%$;
- Cálculos manuales, con una precisión típica del $\pm 20\%$;
- Valores por defecto conforme a EN ISO 14683 [8], con una precisión típica entre un 0% y un 50%.

Esto resulta interesante para realizar la validación de los resultados por comparación con valores oficiales o de referencia.

En la Tabla 19 se facilitan los valores de Ψ_i de las dos referencias oficiales empleadas (DA DB-HE/3 [21] y EN ISO 14683 [8]). En dichas referencias no aparecen casos similares a las mejoras planteadas con esta investigación (M1, M2, M3 y M4). Se aprecia que los valores obtenidos para el caso base se ajustan a los valores de las referencias.

Tabla 19. Valores de Ψ_i de las dos referencias oficiales empleadas

Método y precisión			Valor U de la fachada - $W/(m^2 \cdot K)$				
			0,40	0,35	0,30	0,25	0,15
DA DB-HE/3 [21]	Catálogo $\pm 20\%$	Ψ_i ($W/m \cdot K$)	0,89	0,86	0,83	0,79	0,69
EN-ISO 14683 [8]	Defecto 0% a 50%	Ψ_i ($W/m \cdot K$)	1,05	sin datos			

Las fuentes oficiales consideran los forjados como una capa de material continua sin diferenciar entre sus diferentes materiales (hormigón armado, elementos de aligeramiento, cámaras de aire, etc.), tampoco diferencian por el tipo de forjado (unidireccional o reticular) ni por el tipo de aligeramiento (hormigón, cerámico o EPS).

Además, la norma EN-ISO 14683 [8] sólo facilita un valor de la transmitancia térmica lineal obtenido para forjados con canto 20 cm y un valor U de fachada de 0,375 $W/(m^2 \cdot K)$. Por último, sólo facilitan datos para el caso base.

Comparando el caso base con las dos fuentes de referencia podemos apreciar lo siguiente:

- Los valores del DA DB-HE/3 [21] se ajustan perfectamente a los valores obtenidos con el forjado unidireccional con aligeramientos cerámicos.
- Dado que la norma EN-ISO 14683 [8] usa una U de fachada de 0,375 $W/(m^2 \cdot K)$, podemos apreciar que el valor Ψ_i facilitado por dicha norma se ajusta perfectamente a los valores obtenidos para forjados reticulares con casetón de hormigón y valores U de fachada de 0,40 ó 0,35 $W/(m^2 \cdot K)$.

6.3 Resultados de impacto en los indicadores de los edificios NZEB

La Tabla 20 muestra los valores de transmitancia térmica lineal interior considerados para los encuentros de frentes de forjado con fachadas caravista. La Tabla 21 con fachadas con terminación exterior de mortero monocapa.

Estos valores se han determinando en función del valor U de fachada indicado en la Tabla 7 y los correspondientes valores de Ψ_i indicados en las Tablas 11, 12, 14, 15, 17 y 18, conforme a lo indicado a continuación:

- Para el caso base dos valores:
 - El valor medio de los casos FR y FUC (caso base 1).
 - El valor del caso FUE (caso base 2).
- Para cada una de las mejoras se ha considerado el valor medio de los casos FR, FUC y FUE de cada mejora, conforme a lo siguiente:
 - En Alicante se han empleado los casos FR40, FUC40 y FUE40 pues es el valor más próximo al valor U para cumplir las exigencias normativas [21] de $0,38 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$.
 - En Barcelona los casos FR30, FUC30 y FUE30 pues es el valor más próximo al valor U para cumplir las exigencias normativas [21] de $0,29 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$.
 - En Madrid los casos FR25, FUC25 y FUE25 pues es el valor más próximo al valor U para cumplir las exigencias normativas [21] de $0,27 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$.

Tabla 20. Valores de la transmitancia térmica lineal interior Ψ_i consideradas para el puente térmico de frentes de forjado con fachadas caravista

Caso analizado		Valores $\Psi_i - \text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ para frentes de forjado		
		Alicante	Barcelona	Madrid
Caso base	Forjados reticulares o unidireccionales cerámicos	0,96	0,92	0,88
	Forjados unidireccionales con EPS	0,73	0,65	0,60
Mejora M1	Todos los tipos de forjados	0,48	0,47	0,47
Mejora M2		0,36	0,37	0,37
Mejora M3		0,53	0,42	0,39

Tabla 21. Valores de la transmitancia térmica lineal interior Ψ_i consideradas para el puente térmico de frentes de forjado con fachadas con terminación exterior de mortero monocapa

Caso analizado		Valores $\Psi_i - \text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ para frentes de forjado		
		Alicante	Barcelona	Madrid
Caso base	Forjados reticulares o unidireccionales cerámicos	0,97	0,92	0,87
	Forjados unidireccionales con EPS	0,68	0,62	0,53
Mejora M4	Todos los tipos de forjados	0,24	0,25	0,26

La descripción completa del edificio analizado se describe con detalle en el apartado 4.5 del **Capítulo 4 Materiales y métodos. Mejora constructiva de puentes térmicos lineales de frentes de forjado**. A continuación se facilita un resumen de los resultados obtenidos.

6.3.1 Fachadas con hoja exterior caravista

Estudio en Alicante (zona climática B4)

La Fig 6.11 muestra la comparación de los indicadores NZEB entre las dos situaciones del caso base y las tres mejoras propuestas.

En todos los casos, la mejora M2 permite obtener la mayor reducción en dichos indicadores:

- 22,6% en la demanda de calefacción (primer indicador), la demanda de refrigeración se mantiene prácticamente invariable;
- 20,4% en el consumo de energía primaria total (segundo indicador);
- 20,7% en el consumo de energía primaria no renovable (tercer indicador)
- 21,1% en las emisiones de CO₂.



Figura 6.11: Evolución de los indicadores NZEB para Alicante (zona climática B4).

Estudio en Barcelona (zona climática C2)

La Fig 6.12 muestra la comparación de los indicadores NZEB entre las dos situaciones del caso base y las tres mejoras propuestas.

En todos los casos, la mejora M2 permite obtener la mayor reducción en dichos indicadores:

- 18,5% en la demanda de calefacción (primer indicador), la demanda de refrigeración se mantiene prácticamente invariable;
- 15,5% en el consumo de energía primaria total (segundo indicador);
- 16,0% en el consumo de energía primaria no renovable (tercer indicador)
- 16,4% en las emisiones de CO₂.

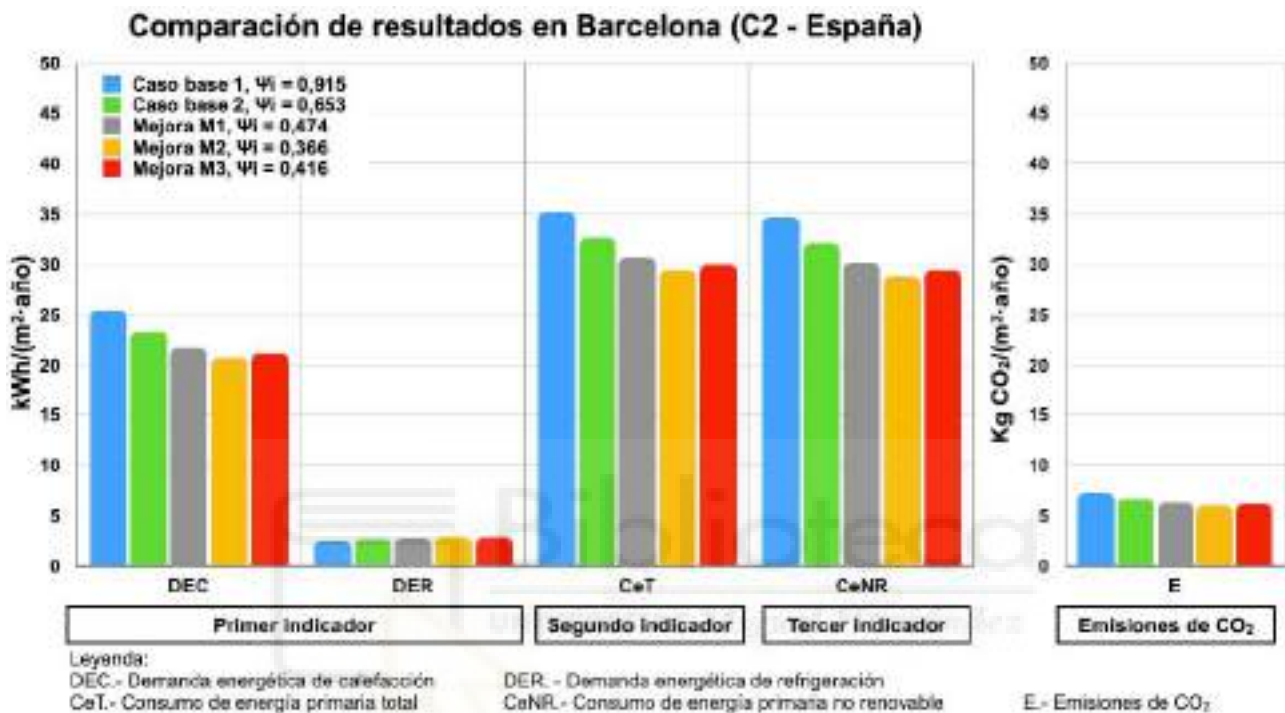


Figura 6.12: Evolución de los indicadores NZEB para Barcelona (zona climática C2).

Estudio en Madrid (zona climática D3)

La Fig 6.13 muestra la comparación de los indicadores NZEB entre las dos situaciones del caso base y las tres mejoras propuestas.

En todos los casos, la mejora M2 permite obtener la mayor reducción en dichos indicadores:

- 16,1% en la demanda de calefacción (primer indicador), la demanda de refrigeración se mantiene prácticamente invariable;
- 14,4% en el consumo de energía primaria total (segundo indicador);
- 14,6% en el consumo de energía primaria no renovable (tercer indicador)
- 14,9% en las emisiones de CO₂.



Figura 6.13: Evolución de los indicadores NZEB para Madrid (zona climática D3).

Análisis del sobrecoste de construcción necesario para reducir anualmente una tonelada de CO₂

Para determinar los costes de construcción de cada caso (base y mejoras) se ha empleado la base de precios de la construcción implementada en el software «Generador de precios» [50], el cual emplea los precios de referencia de los colegios profesionales de arquitectos de España.

El indicador «sobrecoste necesario para reducir una tonelada de CO₂» permite analizar medidas de mejora y conocer cuál es más fácil implementar desde un punto de vista económico.

De esta forma, se pueden tomar decisiones sobre qué medidas de mejora aplicar cómo mejor estrategia para reducir las emisiones de CO₂.

El proceso seguido para obtener este indicador es:

1. A partir del valor por metro cuadrado de emisiones de CO₂ y la superficie total del edificio, se obtienen las emisiones totales anuales, en Kg CO₂/año.
2. La comparación entre el caso base y las mejoras, permite obtener el ahorro total de emisiones, en toneladas de CO₂ al año.
3. Empleando el Generador de precios [50] se obtiene el coste unitario por metro cuadrado de cada caso (base y mejoras). El coste total de cada caso (base y mejoras) se obtiene multiplicando el coste unitario por la superficie total de fachadas.

4. La comparación entre los costes totales (caso base y mejoras), permite obtener el sobrecoste total de inversión en euros.
5. El sobrecoste para reducir una tonelada de CO₂ es la relación entre el sobrecoste total (euros), obtenido en el paso 4 y el ahorro total de emisiones (T CO₂ al año) obtenido en el paso 2.

La Fig. 6.14 presenta una comparativa del indicador para cada localidad en estudio y cada medida de mejora.

La mejora M2 presenta el menor valor del indicador en las tres localidades, siendo por tanto la medida que requiere un menor coste de inversión para lograr una reducción de una tonelada de CO₂ al año.

En consecuencia, la mejora M2, además de permitir la mayor reducción en los indicadores NZEB, es la que presenta el menor valor del indicador de sobrecoste para lograr una reducción de una T CO₂ al año.

Además, también se observa que en las zonas climáticas más severas en invierno (D3) el coste de inversión es menor.

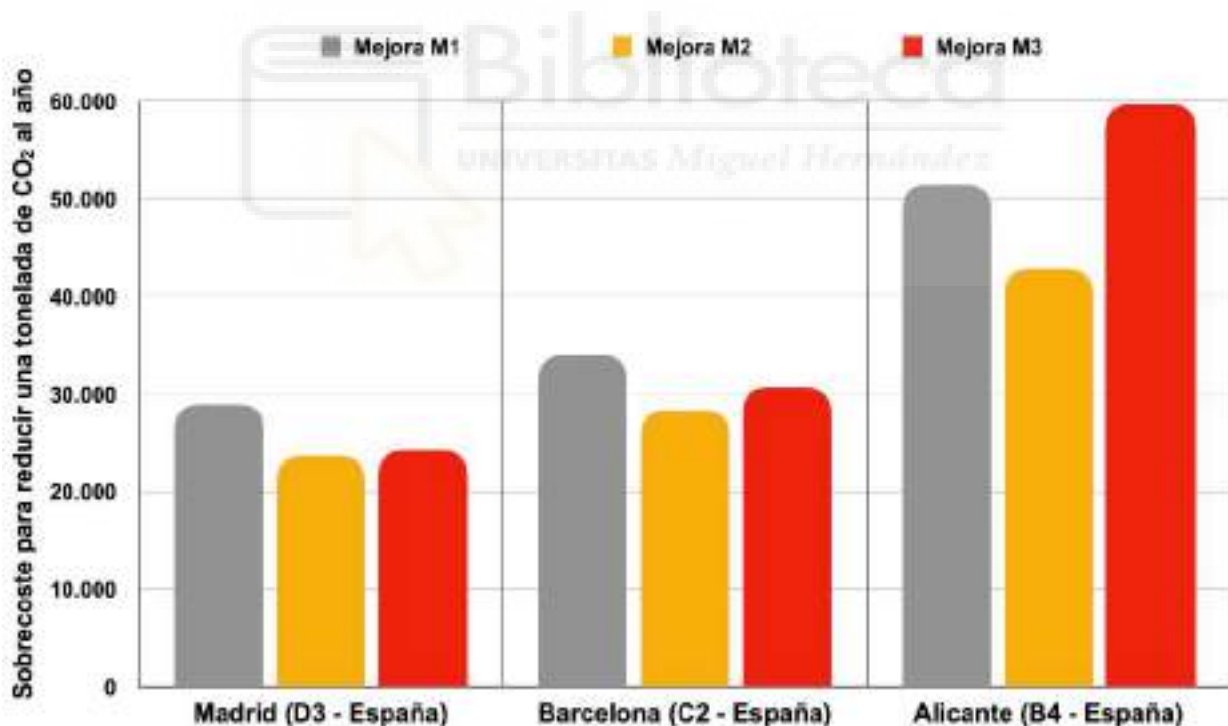


Figura 6.14: Comparativa entre mejoras. Sobrecoste necesario para ahorrar una tonelada de CO₂ al año.

6.3.2 Fachadas con acabado exterior monocapa

Estudio en Alicante (zona climática B4)

La Fig 6.15 muestra la comparación de los indicadores NZEB entre el caso base y la propuesta de mejora M4, logrando las siguientes reducciones en dichos indicadores:

- 30% en la demanda de calefacción (primer indicador), la demanda de refrigeración se mantiene prácticamente invariable;
- 20,1% en el consumo de energía primaria total (segundo indicador);
- 21,3% en el consumo de energía primaria no renovable (tercer indicador);
- 22,7% en las emisiones de CO₂.

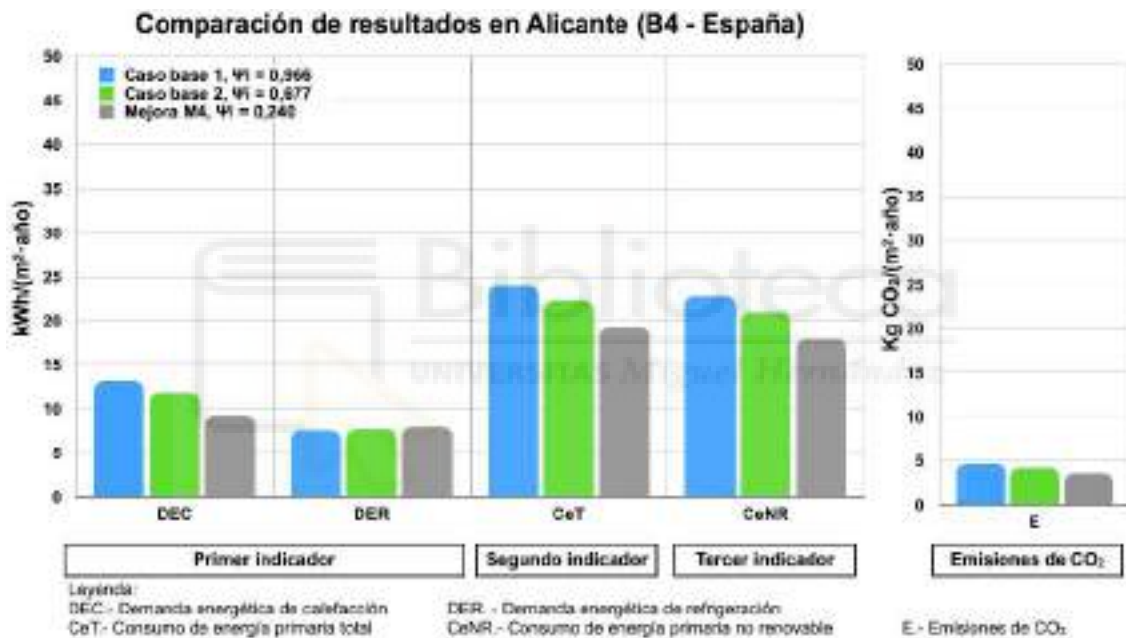


Figura 6.15: Evolución de los indicadores NZEB para Alicante (zona climática B4).

Estudio en Barcelona (zona climática C2)

La Fig 6.16 muestra la comparación de los indicadores NZEB entre el caso base y la propuesta de mejora M4, logrando las siguientes reducciones en dichos indicadores:

- 21% en la demanda de calefacción (primer indicador), la demanda de refrigeración se mantiene prácticamente invariable;
- 18,7% en el consumo de energía primaria total (segundo indicador);
- 19,1% en el consumo de energía primaria no renovable (tercer indicador)
- 19,5% en las emisiones de CO₂.

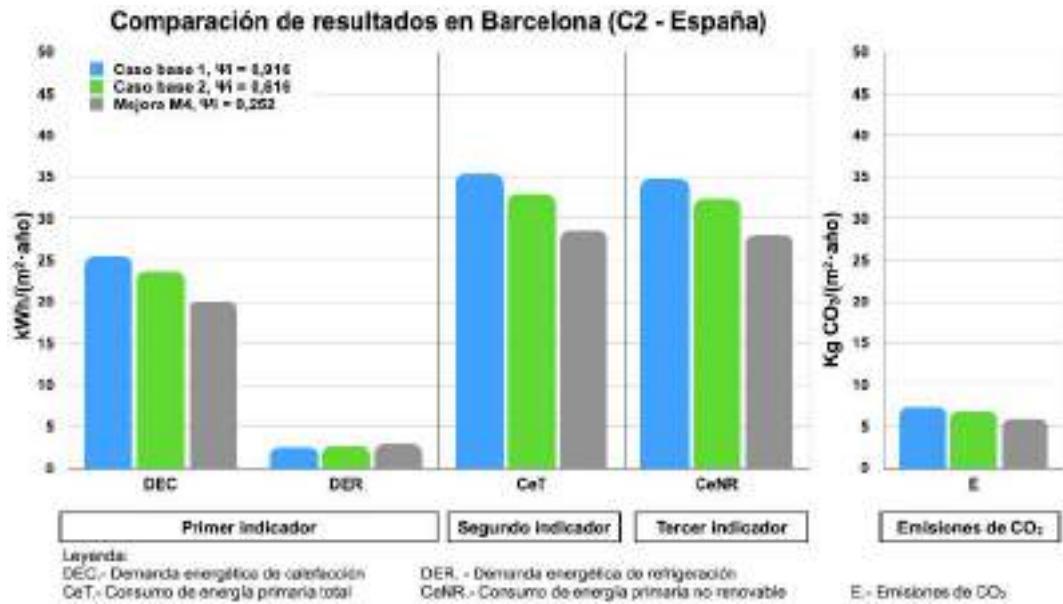


Figura 6.16: Evolución de los indicadores NZEB para Barcelona (zona climática C2).

Estudio en Madrid (zona climática D3)

La Fig 6.17 muestra la comparación de los indicadores NZEB entre el caso base y la propuesta de mejora M4, logrando las siguientes reducciones en dichos indicadores:

- 19,8% en la demanda de calefacción (primer indicador), la demanda de refrigeración se mantiene prácticamente invariable;
- 17,7% en el consumo de energía primaria total (segundo indicador);
- 18% en el consumo de energía primaria no renovable (tercer indicador)
- 18,4% en las emisiones de CO₂.



Figura 6.17: Evolución de los indicadores NZEB para Madrid (zona climática D3).

CAPÍTULO 7
DISCUSIÓN DE RESULTADOS. MEJORA DE LA
HERMETICIDAD AL AIRE DE LA ENVOLVENTE
TÉRMICA DE LOS EDIFICIOS

Capítulo 7. Resultados. Mejora de la hermeticidad al aire de la envolvente térmica de los edificios

La realización de ensayos experimentales en ciento once viviendas de obra nueva situadas en varias ciudades de las provincias de Alicante, Valencia y Palma de Mallorca, ha permitido caracterizar, mediante el parámetro n_{50} , la hermeticidad al aire de dichas viviendas.

Además, se ha realizado propuestas constructivas para reducir las infiltraciones de aire y mejorar así la hermeticidad de los edificios.

De forma similar a lo realizado en la primera investigación, se ha procedido a analizar la contribución de la hermeticidad al aire a los indicadores anuales de eficiencia energética de los edificios de vivienda NZEB y también, estudiar el sobrecoste de construcción por cada tonelada de CO₂ ahorrada.

A continuación, se facilita un resumen de los resultados obtenidos.

7.1 Resultados de la tasa de renovación de aire o n_{50}

Caso base: Hermeticidad al aire de los edificios. Práctica habitual

Con los resultados de los ensayos realizados se han elaborado los histogramas que se muestra en la Fig. 7.1 para los casos de:

- Despresurización, la presión en el interior del edificio es mayor que en el exterior;
- Presurización, la presión en el interior del edificio es mayor que en el exterior;
- Y valores medios de ensayo.

En cada uno de los histograma:

- El eje vertical representa la frecuencia, es decir, el número de ensayos que han obtenido el mismo valor n_{50} . Para ello, se han agrupado los resultados de ensayo a intervalos de 0,50 h⁻¹.
- El eje horizontal representa la tasa de renovación de aire o n_{50} .

Los valores medio, mínimo y máximo obtenidos para la tasa de renovación de aire o n_{50} , son:

- Medio: 11,04 h⁻¹.
- Mínimo: 4,84 h⁻¹.
- Máximo: 23,89 h⁻¹.

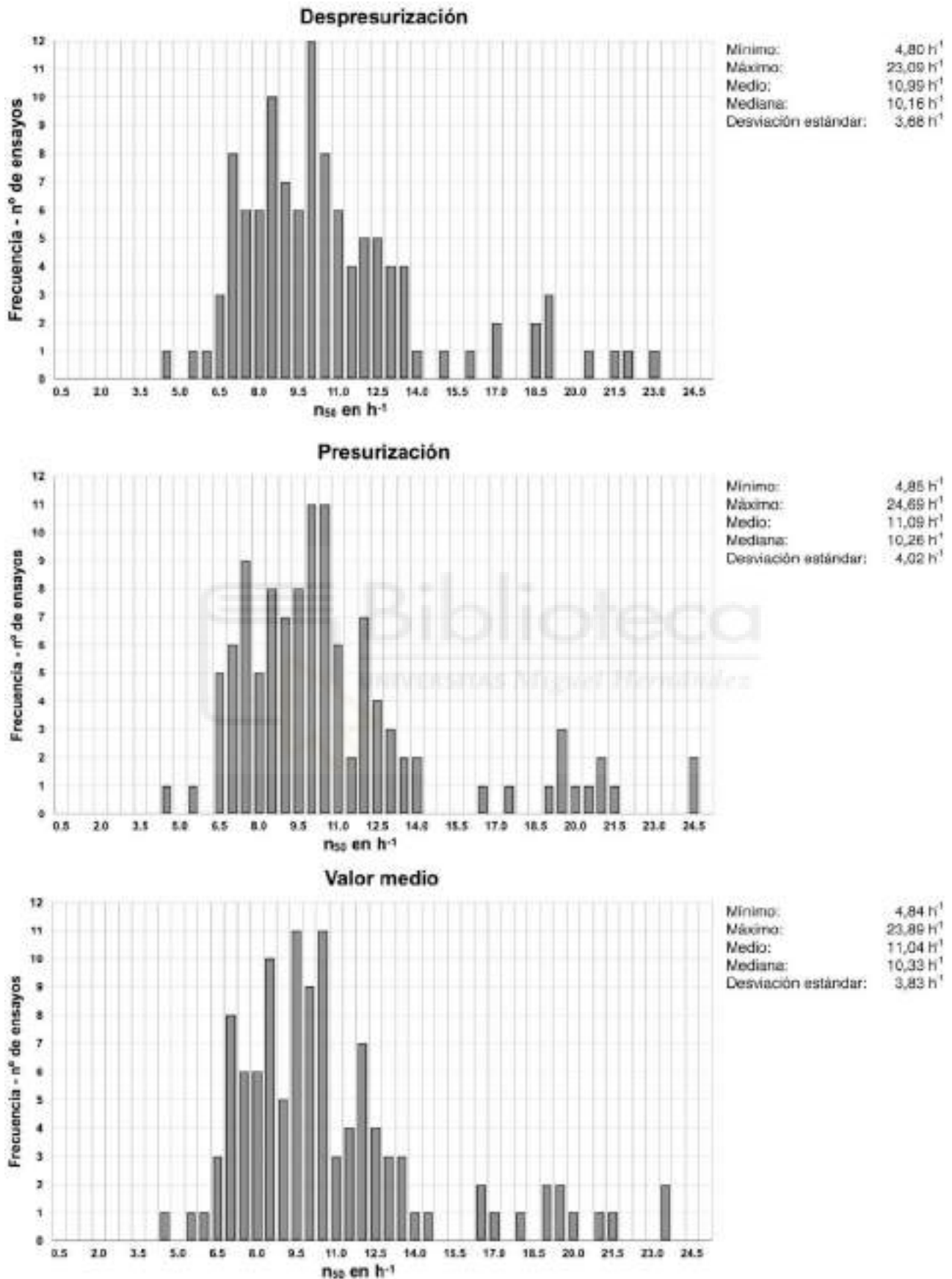


Figura 7.1: Histogramas con valores n_{50} obtenidos mediante ensayo Blower Door (práctica habitual).

Caso mejora M1: Mejora básica

La Tabla 22 muestra la comparación entre los resultados obtenidos de n_{50} entre el caso base y al aplicar la mejora «M1 - Mejora básica», siguiendo los criterios indicados en la Tabla 10 sobre las tres viviendas en las que se aplicó dicha mejora.

Tabla 22. Comparación entre el caso base y la mejora «M1 - Mejora básica»

Caso	PH - Práctica habitual - n_{50} - h^{-1}			M1 - Mejora básica - n_{50} - h^{-1}			
	Despresurización	Presurización	Media	Despresurización	Presurización	Media	%
1	12,78	12,03	12,40	7,86	9,03	8,44	31,9 %
2	18,75	19,67	19,21	7,28	6,78	7,03	63,4 %
3	20,98	21,47	21,23	8,92	8,71	8,82	58,5 %

La columna % indica la reducción lograda en término del valor medio n_{50} obtenido con el caso base y la mejora «M1 - Mejora básica».

Caso mejora M2: Mejora avanzada

La Tabla 23 muestra la comparación entre los resultados obtenidos de n_{50} entre el caso base y al aplicar la mejora «M2 - Mejora avanzada», siguiendo los criterios indicados en la Tabla 10 sobre las tres viviendas en las que se aplicó dicha mejora.

Tabla 23. Comparación entre el caso base y la mejora «M2 - Mejora avanzada»

Caso	PH - Práctica habitual - n_{50} - h^{-1}			M2 - Mejora avanzada - n_{50} - h^{-1}			
	Despresurización	Presurización	Media	Despresurización	Presurización	Media	%
4	15,01	14,69	14,85	1,09	1,13	1,11	92,5 %
5	14,85	14,23	14,54	1,76	1,83	1,80	87,6 %

La columna % indica la reducción lograda en término del valor medio n_{50} obtenido con el caso base y la mejora «M2 - Mejora avanzada».

Tal y como ha quedado reflejado en las Tablas 22 y 23, la aplicación de las dos mejoras constructivas propuestas, permite reducir el valor medio n_{50} un 51,3% (valor promedio de las reducciones obtenidas para la mejora «M1 - Mejora básica») y un 90,1% (valor promedio de las reducciones obtenidas para la mejora «M2 - Mejora avanzada»).

En la Tabla 24 se muestran los valores previstos de n_{50} que se obtienen al aplicar las dos mejoras propuestas sobre el valor medio de todos los ensayos realizados con la solución del caso base, práctica habitual. Se muestra además, el valor máximo permitido por el estándar Passive House [20].

Tabla 24. Valores previstos de n_{50} al aplicar las dos mejoras propuestas sobre el valor medio de todos los ensayos realizados con el caso base, práctica habitual y valor máximo permitido por el estándar Passive House

PH - Práctica habitual	M1 - Mejora básica	M2 - Mejora avanzada	Estándar Passive House
11,04 h^{-1}	5,38 h^{-1}	1,09 h^{-1}	0,64 h^{-1}

Se ha podido comprobar que, la aplicación de espuma de poliuretano y enlucido de yeso, «M1 - Mejora básica», en el perímetro de las ventanas no genera un sellado perfecto, quedando en ocasiones pequeños huecos por donde se producen infiltraciones de aire.

La Fig. 7.2 muestra un detalle del perímetro de una ventana en el que se aprecian los pequeños huecos indicados anteriormente.



Figura 7.2: Pequeños huecos en el perímetro de una ventana al aplicar «M1 - Mejora básica».

También se ha podido comprobar que, los conductos de cableados eléctricos o de telecomunicaciones que atraviesan los cerramientos exteriores de las viviendas, generan infiltraciones de aire si no están correctamente sellados, situación que sólo se corrige al aplicar membranas líquidas de hermeticidad, «M2 - Mejora avanzada».

La Fig. 7.3 muestra un conducto de cableado eléctrico o de telecomunicaciones aplicando la mejora «M1 - Mejora básica» o la «M2 - Mejora avanzada»



Figura 7.3: Izquierda conducto de cableado al aplicar la «M1 - Mejora básica». Derecha conducto de cableado al aplicar «M2 - Mejora avanzada».

7.2 Resultados de impacto en los indicadores de los edificios NZEB

Estudio en Alicante (zona climática B4)

La Fig. 7.4 muestra una comparación de los indicadores NZEB entre el caso base, las dos mejoras propuestas y el valor máximo permitido por el estándar Passive House [20].

En todos los casos, la mejora «M2 - Mejora avanzada» permite obtener la mayor reducción en dichos indicadores respecto al caso base - práctica habitual:

- 27,7% en la demanda de calefacción (primer indicador), la demanda de refrigeración permanece prácticamente constante;
- 21,7% en el consumo de energía primaria total (segundo indicador);
- 22,5% en el consumo de energía primaria no renovable (tercer indicador)
- 23,3% en las emisiones de CO₂. El resultado obtenido al aplicar el estándar Passive House [20] es muy similar a la «M2 - Mejora avanzada».



Figura 7.4: Evolución de los indicadores NZEB para Alicante (Zona climática B4).

Estudio en Barcelona (zona climática C2)

La Fig. 7.5 muestra una comparación de los indicadores NZEB entre el caso base, las dos mejoras propuestas y el valor máximo permitido por el estándar Passive House [20].

En todos los casos, la mejora «M2 - Mejora avanzada» permite obtener la mayor reducción en dichos indicadores respecto al caso base - práctica habitual:

- 24,8% en la demanda de calefacción (primer indicador), la demanda de refrigeración permanece prácticamente constante;
- 23,4% en el consumo de energía primaria total (segundo indicador);
- 23,6% en el consumo de energía primaria no renovable (tercer indicador)
- 23,8% en las emisiones de CO₂. El resultado obtenido al aplicar el estándar Passive House [20] es muy similar a la «M2 - Mejora avanzada».

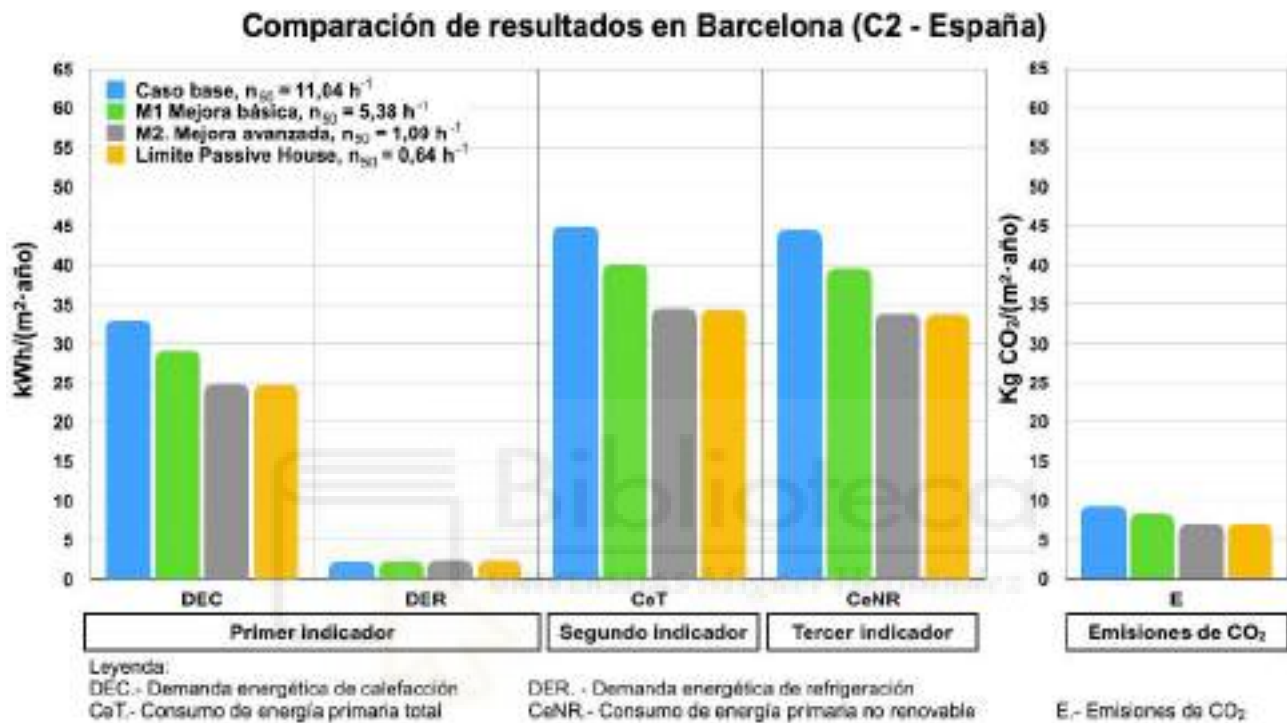


Figura 7.5: Evolución de los indicadores NZEB para Barcelona (Zona climática C2).

Estudio en Madrid (zona climática D3)

La Fig. 7.6 muestra una comparación de los indicadores NZEB entre el caso base, las dos mejoras propuestas y el valor máximo permitido por el estándar Passive House [20].

En todos los casos, la mejora «M2 - Mejora avanzada» permite obtener la mayor reducción en dichos indicadores respecto al caso base - práctica habitual:

- 23,4% en la demanda de calefacción (primer indicador), la demanda de refrigeración permanece prácticamente constante;
- 22,0% en el consumo de energía primaria total (segundo indicador);
- 22,2% en el consumo de energía primaria no renovable (tercer indicador)
- 22,5% en las emisiones de CO₂. El resultado obtenido al aplicar el estándar Passive House [20] es muy similar a la «M2 - Mejora avanzada».

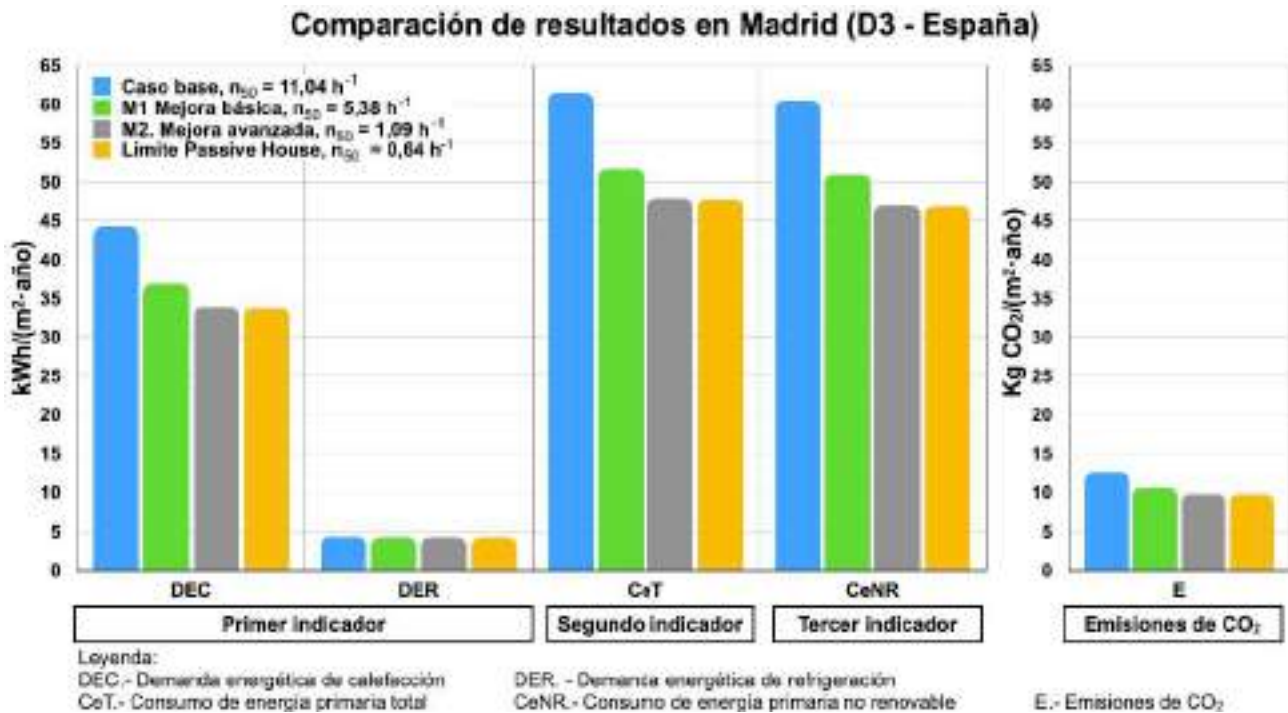


Figura 7.6: Evolución de los indicadores NZEB para Madrid (Zona climática D3).

Como se aprecia en las figuras anteriores, en las tres ciudades en estudio, se ha observado que, la demanda de refrigeración permanece prácticamente invariable, tal y como ya indicó Silvia Guillén-Lambea et. al [33].

Dicho estudio recomendó, para las localidades situadas en el área mediterránea, modificar el valor máximo permitido por el estándar Passive House [20] a $1,0 \text{ h}^{-1}$ ya que a partir de dicho valor su influencia en la demanda de calefacción es muy reducida.

Este efecto también se ha podido observar en las tres ciudades en estudio donde no hay variación entre la «M2 - Mejora avanzada» $1,09 \text{ h}^{-1}$ y el valor máximo permitido por el estándar Passive House $0,64 \text{ h}^{-1}$.

Análisis del sobrecoste de construcción necesario para reducir anualmente una tonelada de CO₂

El sobrecoste de construcción necesario para reducir una tonelada de CO₂ al año, se ha determinado siguiendo la misma metodología indicada en el apartado 6.3.1.

La Fig. 7.7 presenta una comparativa del indicador para cada localidad en estudio y cada medida de mejora.

La mejora «M1 - Mejora básica» presenta el menor valor del indicador en las tres localidades, siendo por tanto la medida que requiere un menor coste de inversión para lograr una reducción de una tonelada de CO₂ al año.

Además, también se observa que en las zonas climáticas más severas en invierno (D3) el coste de inversión es menor.

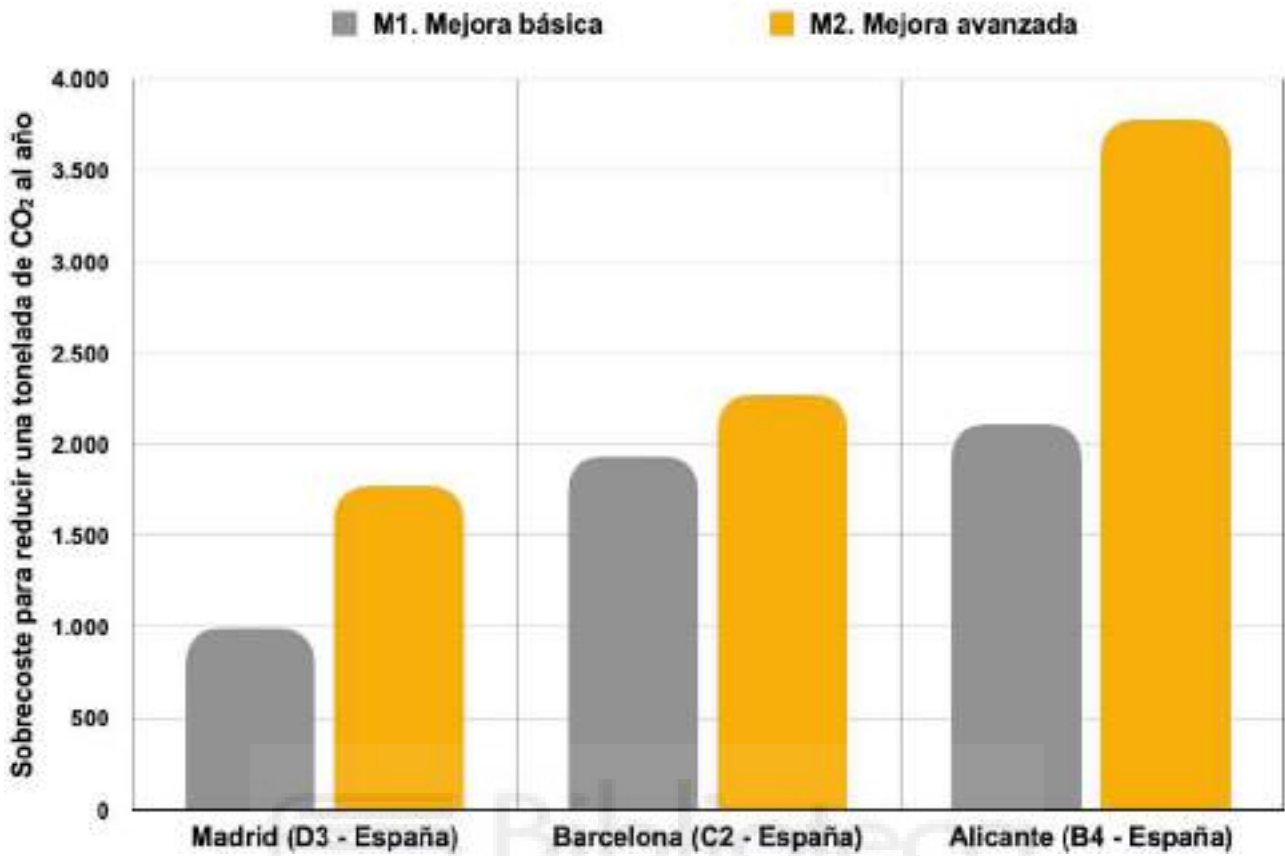


Figura 7.7: Comparativa entre mejoras. Sobrecoste necesario para reducir una tonelada de CO₂ al año.

CAPÍTULO 8
CONCLUSIONES



Capítulo 8. Conclusiones

8.1 Conclusiones del estudio sobre mejora de puentes térmicos

La primera línea de investigación se centra en los puentes térmicos de frente de forjado (encuentro de fachadas con forjados intermedios) abordando el análisis tanto de fachadas con hoja exterior caravista como con acabado exterior monocapa. Se ha contemplado el sistema tradicional de construcción de fachadas en España (fachadas de doble hoja cerámica).

El artículo publicado aborda exclusivamente el caso de la fachada con hoja exterior caravista proponiendo tres mejoras constructivas, dos de ellas novedosas denominadas M2 y M3.

La mejora M1 consiste en disponer la hoja exterior caravista autoportante apoyada sobre un perfil de acero inoxidable anclado al frente de forjado y, entre dicha hoja cerámica y el frente de forjado, se dispone de una capa de aislamiento térmico.

La mejora M2 consiste en situar un aislamiento térmico de 5 mm de espesor entre el perfil de acero inoxidable, utilizado para el apoyo de la hoja exterior caravista de la fachada, y el frente de forjado.

La mejora M3 consiste en sustituir la primera línea de aligeramientos del forjado por piezas de poliestireno expandido EPS, sustitución de la primera y última hilada de ladrillos de la hoja interior cerámica por bloques de vidrio celular y la colocación, bajo el pavimento y en todo su perímetro, de una banda de aislamiento térmico de 50 cm de ancho y 30 mm de espesor.

El estudio se ha llevado a cabo teniendo en cuenta los indicadores NZEB de edificios de viviendas en España. Se pueden extraer las siguientes conclusiones:

La Fig. 8.1 muestra los resultados del análisis de distribución de temperaturas para el caso base y las tres mejoras propuestas.

Para facilitar la comprensión de dicha figura sólo se ha representado los gráficos correspondientes al valor máximo ($0,40 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$) y mínimo ($0,15 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$) de las transmitancias térmicas contempladas para las fachadas y los tres tipos de forjado.

- En el caso base se aprecia perfectamente el efecto del puente térmico y la distribución de temperaturas en dicha zona. El valor de la transmitancia térmica lineal del puente térmico se ve influenciado por el tipo de forjado, sus aligeramientos y el valor U de la fachada.
- En las mejoras M1 y M2 se aprecia el efecto de la capa de aislamiento térmico colocado en el lado izquierdo de la fachada: las curvas de temperatura se desplazan hacia la izquierda, esto hace que el valor de la transmitancia térmica lineal del puente térmico no se vea influenciado por el tipo de forjado o por sus aligeramientos, presentando valores constantes independientemente del valor U de la fachada.

- En la mejora M3 se aprecia el efecto de la capa de aislamiento térmico colocado en el lado derecho de la fachada: las curvas de temperatura se desplazan a la derecha. El valor de la transmitancia térmica lineal del puente térmico se ve influenciado por el valor U de la fachada pero no por el tipo de forjado o de sus aligeramientos si el valor U de a fachada es igual o inferior a $0,30 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$.

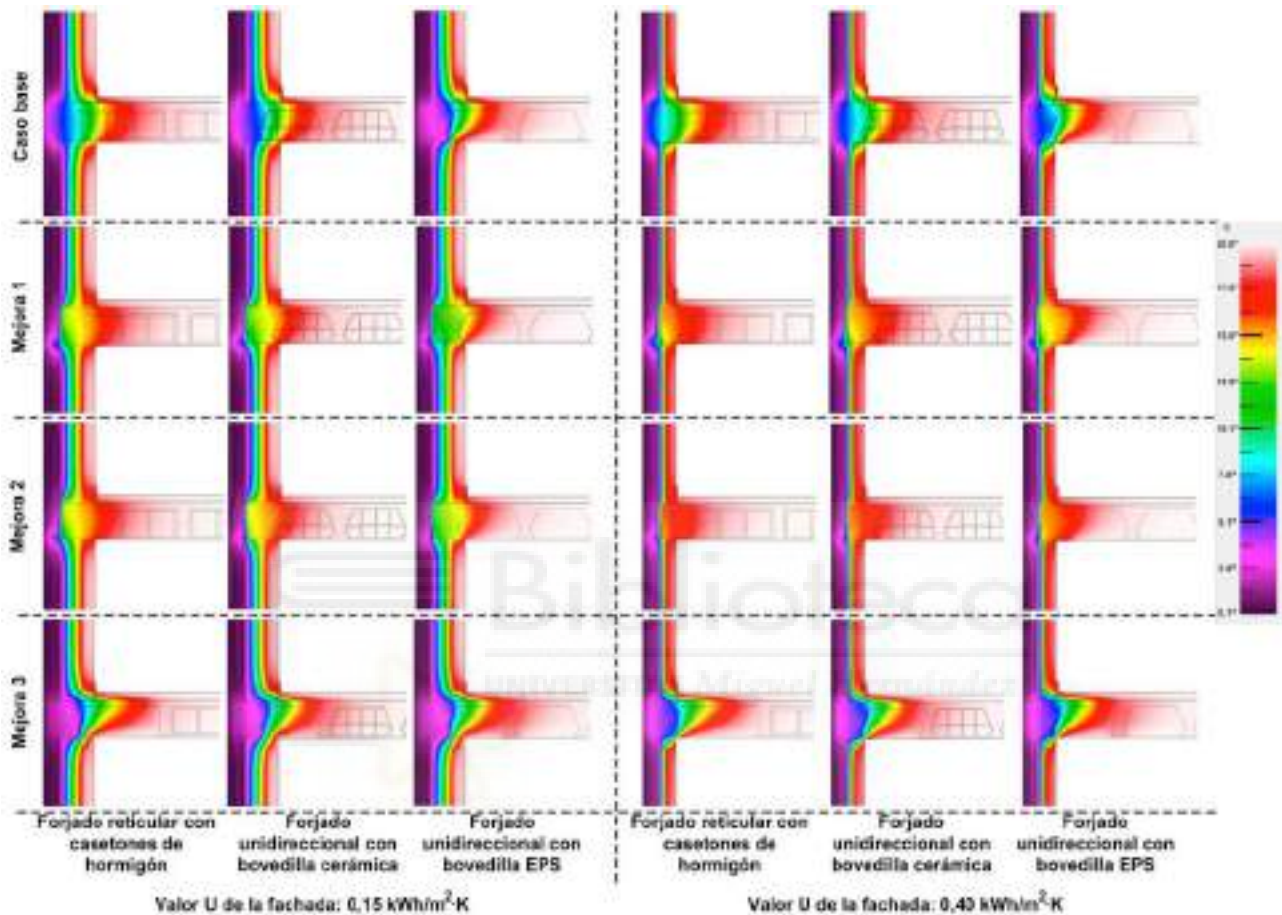


Figura 8.1: Distribución de temperaturas para el caso base y las mejoras M1, M2 y M3.

- Las mejoras M1 y M2 (caravista autoportante con aislamiento térmico en el frente de forjado) muestran que, en el valor Ψ_i de la transmitancia térmica lineal interior, tiene poca influencia el valor U de la fachada o el tipo de forjado (reticular o unidireccional) o el tipo de aligeramiento del forjado (hormigón, cerámica o EPS). El valor Ψ_i se muestra muy constante (en el caso M1 la variación entre el resultado máximo y el mínimo es de $0,097 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ y en el caso M2 es de $0,111 \text{ W/m}\cdot\text{K}$) y eso se debe a que la continuidad de la capa de aislamiento térmico en el puente térmico se logra por el lado exterior de la fachada
- En el caso de la mejora M3 la continuidad de la capa de aislamiento en el puente térmico se logra por el lado interior de la fachada y eso provoca que el valor Ψ_i no se muestre constante, no obstante el tipo de forjado o de aligeramiento no influye en dicho valor pero si lo hace por el valor U de la fachada.

- Las dos mejoras constructivas novedosas (M2 y M3) permiten reducir el valor de la transmitancia térmica lineal interior Ψ_i del puente térmico entre un 20 % y un 63,4 %.
- La mejora M2 es la que aporta una mayor reducción en los indicadores NZEB:
 - Alicante (zona climática B4): 22,6% en la demanda de calefacción (primer indicador); 20,4% en el consumo de energía primaria total (segundo indicador); 20,7% en el consumo de energía primaria no renovable (tercer indicador) y 21,1% en las emisiones de CO₂.
 - Barcelona (zona climática C2): 18,5% en la demanda de calefacción (primer indicador); 15,5% en el consumo de energía primaria total (segundo indicador); 16,0% en el consumo de energía primaria no renovable (tercer indicador) y 16,4% en las emisiones de CO₂.
 - Madrid (zona climática D3): 16,1% en la demanda de calefacción (primer indicador); 14,4% en el consumo de energía primaria total (segundo indicador); 14,6% en el consumo de energía primaria no renovable (tercer indicador) y 14,9% en las emisiones de CO₂.
- Asimismo, la mejora M2 presenta un menor valor del indicador sobre coste de construcción para lograr una reducción de una tonelada de CO₂ al año.

También se ha estudiado la **mejora para el caso de fachadas con acabado exterior de mortero monocapa**.

Para ese caso se ha propuesto la mejora M4, que busca dar continuidad a la capa de aislamiento térmico en la zona del frente de forjado mediante el empleo de dos elementos: una capa de aislamiento térmico de 40 mm de espesor en el frente de forjado y la sustitución de la primera y última hilada de ladrillos de la hoja exterior cerámica por bloques de vidrio celular cuya función es la de conectar la capa de aislamiento térmico del frente de forjado con la existente en la cámara entre las hojas de ladrillo.

La Fig. 8.2 muestra los resultados del análisis de distribución de temperaturas para el caso base y la mejora M4.

Para facilitar la comprensión de dicha figura sólo se ha representado los gráficos correspondientes al valor máximo (0,40 W/m²·K) y mínimo (0,15 W/m²·K) de las transmitancias térmicas contempladas para las fachadas y los tres tipos de forjado.

- En el caso base se produce la misma situación que con las fachadas caravista: se aprecia perfectamente el efecto del puente térmico y la distribución de temperaturas en dicha zona. El valor de la transmitancia térmica lineal del puente térmico se ve influenciado por el tipo de forjado, sus aligeramientos y el valor U de la fachada.

- En el caso de la mejora M4 se produce la misma situación que con las mejoras M1 y M2 de las fachadas caravista: se aprecia el efecto de la capa de aislamiento térmico colocado en el lado izquierdo de la fachada: las curvas de temperatura se desplazan hacia la izquierda, esto hace que el valor de la transmitancia térmica lineal del puente térmico no se vea influenciado por el tipo de forjado o por sus aligeramientos, presentando valores constantes independientemente del valor U de la fachada.

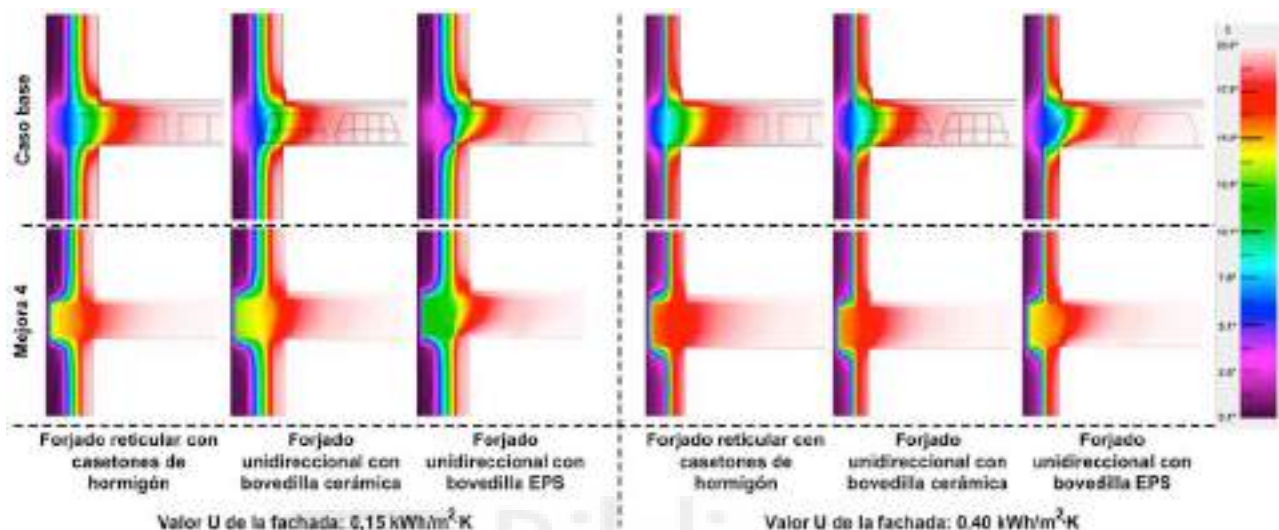


Figura 8.2: Distribución de temperaturas para el caso base y la mejora M4.

La mejora diseñada (M4) permiten reducir el valor de la transmitancia térmica lineal interior Ψ_i del puente térmico entre un 47,3 % y un 75,4 %.

En este caso el impacto en la reducción de los indicadores NZEB de los edificios de viviendas en España es:

- Alicante (zona climática B4): 30% en la demanda de calefacción (primer indicador); 20,1% en el consumo de energía primaria total (segundo indicador); 21,3% en el consumo de energía primaria no renovable (tercer indicador) y 22,7% en las emisiones de CO₂.
- Barcelona (zona climática C2): 21% en la demanda de calefacción (primer indicador); 18,7% en el consumo de energía primaria total (segundo indicador); 19,1% en el consumo de energía primaria no renovable (tercer indicador) y 19,5% en las emisiones de CO₂.
- Madrid (zona climática D3): 19,8% en la demanda de calefacción (primer indicador); 17,7% en el consumo de energía primaria total (segundo indicador); 18% en el consumo de energía primaria no renovable (tercer indicador) y 18,4% en las emisiones de CO₂.

Se puede concluir que el tratamiento, en términos de reducción de la transmitancia térmica lineal, de los puentes térmicos de frente de forjado tiene un efecto de reducción de la demanda energética de calefacción, sobre todo cuando aumentamos la altura de los edificios ya que se incrementa la longitud de dicho puente térmico y, con ello, el flujo de calor en dicho punto. Además, en las tres ciudades en estudio, se ha observado que la demanda de refrigeración permanece prácticamente invariable.

El estudio demuestra, de esta forma, que el análisis y el diseño de soluciones constructivas para reducir la transmitancia térmica lineal de los puentes térmicos de frente de forjado es una estrategia que contribuye a alcanzar los requisitos de los edificios NZEB.

8.2 Conclusiones del estudio sobre mejora de la hermeticidad al aire

La segunda línea de investigación propone dos mejoras de la hermeticidad al aire de los edificios de vivienda (denominadas «M1 - Mejora básica» y «M2 - Mejora avanzada»). Dichas mejoras son novedosas ya que, en España, no es habitual prestar atención a la hermeticidad al aire de los edificios. Para ello, las mejoras se comparan con la práctica habitual empleada en la construcción en España.

El análisis se ha realizado a partir de datos experimentales realizados mediante ensayos Blower Door sobre 111 viviendas construidas entre los años 2020 y 2022. Precisamente, en la bibliografía no hay datos disponibles sobre la hermeticidad al aire de edificios de nueva construcción.

Sobre varias de dichas viviendas, se ha aplicado las mejoras propuestas en esta investigación, repitiendo el ensayo Blower Door con el fin de ver su efecto en la hermeticidad al aire. Además, este estudio analiza el efecto de la hermeticidad al aire en los indicadores NZEB de edificios residenciales en España.

La mejora «M1 - Mejora básica» consiste en rellenar los orificios creados por el paso de instalaciones (electricidad, fontanería, telecomunicaciones, etc.) y el perímetro de las ventanas, con enlucido de yeso y espuma de poliuretano. La mejora «M2 - Mejora avanzada» consiste en rellenar los orificios creados por el paso de instalaciones, con espuma flexible de poliuretano y membrana líquida y el perímetro de las ventanas con cintas precomprimidas de poliuretano, espuma flexible de poliuretano y membrana líquida.

Se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- La tasa de renovación de aire con una diferencia de presión de 50 Pa o n_{50} , obtenida mediante los ensayos Blower Door, tiene un valor medio, para las viviendas construidas con la práctica habitual, de 11,04 h⁻¹. En el caso de la mejora «M1 - Mejora básica», el valor medio es de 5,38 h⁻¹ (reducción del 51,3 %) y para la mejora «M2 - Mejora avanzada» de 1,09 h⁻¹ (reducción del 90,1 %).
- La mejora «M2 - Mejora avanzada» es la que aporta una mayor reducción en los indicadores NZEB:

- Alicante (zona climática B4): 27,7 % en la demanda de calefacción (primer indicador); 21,7 % en el consumo de energía primaria total (segundo indicador); 22,5 % en el consumo de energía primaria no renovable (tercer indicador) y 23,3 % en las emisiones de CO₂.
- Barcelona (zona climática C2): 24,8 % en la demanda de calefacción (primer indicador); 23,4 % en el consumo de energía primaria total (segundo indicador); 23,6 % en el consumo de energía primaria no renovable (tercer indicador) y 23,8 % en las emisiones de CO₂.
- Madrid (zona climática D3): 23,4 % en la demanda de calefacción (primer indicador); 22,0 % en el consumo de energía primaria total (segundo indicador); 22,2 % en el consumo de energía primaria no renovable (tercer indicador) y 22,5 % en las emisiones de CO₂.
- También se ha observado que, en las tres ciudades en estudio, no hay variación en los indicadores NZEB entre la mejora «M2 - Mejora avanzada» (1,09 h⁻¹) y el valor máximo permitido por el estándar Passive House (0,64 h⁻¹).
- Por otro lado, la mejora «M1 - Mejora básica» presenta un menor valor del indicador sobrecoste de construcción para lograr una reducción de una tonelada de CO₂ al año.

Se puede concluir que el tratamiento, en términos de reducción de la tasa de renovación de aire con una diferencia de presión de 50 Pa o n₅₀, tiene un efecto de reducción de la demanda energética de calefacción. Además, en las tres ciudades en estudio, se ha observado que la demanda de refrigeración permanece prácticamente invariable. El estudio demuestra, de esta forma, que la mejora de la hermeticidad de los edificios es una estrategia que contribuye a alcanzar los requisitos de los edificios NZEB.

8.3 Futuras líneas de investigación

A continuación se enumera una serie de posibles futuras líneas de investigación para complementar los trabajos desarrollados en esta investigación.

1. *Mejora de puentes térmicos lineales generados por el encuentro de fachadas con cubiertas planas.*

Como ha quedado demostrado en esta investigación, los tipos de puentes térmicos que generan mayor flujo de calor son los frentes de forjado, contorno de huecos (jambas, alfeizar y dinteles) y pilares. Esta investigación ha realizado propuestas de mejora para puentes térmicos de frentes de forjado. La mejora del puente térmico de huecos es relativamente sencilla y la de pilares no tiene ninguna complejidad. Sin embargo, la mejora del puente térmico generado por el encuentro de fachadas de doble hoja cerámica y cubiertas planas supone un reto ya que en dichas zonas existen ciertos elementos constructivos, como los petos o muretes perimetrales de cubierta, que complican la solución de dicho encuentro.

2. *Estudio de los puentes térmicos puntuales generados por las fijaciones con pernos de anclaje del perfil metálico de apoyo de la hoja cerámica caravista exterior de las fachadas.*

Como se ha indicado en el apartado 4.1.3, las mejoras del puentes térmico de frente de forjado planteadas en esta investigación y denominadas como M1 y M2, no incluyen el efecto que generan los pernos de anclaje del perfil metálico en el flujo de calor. En la bibliografía existen estudios sobre los puentes puntuales generados por las fijaciones del aislamiento térmico en la solución tipo ETICS y la mayoría de ellas indican que para considerar su efecto hay que incrementar el valor U de la fachada en un determinado porcentaje (en función del tipo de fijación, número de fijaciones por metro cuadrado, etc.). Siguiendo esa misma metodología, se pretende analizar el efecto de los pernos de anclaje del apoyo metálico de la hoja cerámica exterior.

3. *Efecto del tipo de solución constructiva de las fachadas en la hermeticidad al aire (infiltraciones).*

En los ensayos Blower Door realizados se ha apreciado una cierta influencia en la hermeticidad al aire (infiltraciones) del tipo de sección constructiva de la fachada. A priori parece que cuando existen fachadas y tabiquería interior realizada con sistemas de construcción seca (por ejemplo, placas de yeso laminado o sistemas steel frame) se generan mayores problemas de sellado y, en consecuencia, mayores infiltraciones de aire, sobretodo cuando el perímetro de los patinillos se cierra exclusivamente con sistemas de placa de yeso laminado. En la actualidad se están realizando nuevos ensayos Blower Door en edificios con soluciones de placa de yeso laminado y en varios casos la tasa de renovación de aire o n_{50} supera el valor de 20 h^{-1} . Se pretende analizar la influencia del tipo de solución constructiva de la fachada, y de las tabiquerías interiores en la hermeticidad al aire de los edificios.

REFERENCIAS



Referencias

- [1] Eurostat. Statistical Books. Energy data. 2020 edition. <https://ec.europa.eu/eurostat/documents/3217494/11099022/KS-HB-20-001-EN-N.pdf/bf891880-1e3e-b4ba-0061-19810ebf2c64?t=1594715608000>
- [2] Directive 2010/31/UE of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010, on the energy performance of buildings (recast). <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/HTML/?uri=CELEX:32010L0031&from=ES>
- [3] Topic Nearly zero-energy buildings. European Commission. https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/nearly-zero-energy-buildings_en
- [4] Directive (EU) 2018/844 of the European Parliament and of the Council of 30 May 2018, amending Directive 2010/31/UE on the energy performance of buildings and Directive 2012/27/UE on energy efficiency. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=CELEX%3A32018L0844>
- [5] EN ISO 52000-1:2017. Energy performance of buildings. Overarching EPB assessment. Part 1: General framework and procedures.
- [6] M.J. Romero, F. Aguilar, P. G. Vicente. *Analysis of design improvements for thermal bridges formed by double-brick façades and intermediate slabs for nZEB residential buildings in Spain. Journal of Building Engineering* 44 (2021) 103270. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103270>
- [7] EN ISO 10211: 2007. Thermal bridges in building construction. Heat flows and surface temperatures. Detailed calculations.
- [8] EN ISO 14683:2017. Thermal bridges in building construction. Linear thermal transmittance. Simplified methods and default values.
- [9] F. Aguilar, J.P. Solano, P.G. Vicente. Transient modeling of high-inertial thermal bridges in building using the equivalent thermal wall method. *Applied Thermal Engineering* 67 (2014) 370-377 <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.03.058>
- [10] Sofia Real, M. Glória Gomes, A. Moret Rodrigues, J. Alexandre Bogas. Contribution of structural lightweight aggregate concrete to the reduction of thermal bridging effect in buildings. *Construction and Building Materials* 121 (2016) 460-470. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.06.018>
- [11] A. Capozzoli, A. Gorrino, V. Corrado. A building thermal bridges sensitivity analysis, *Applied Energy* 107 (2013) 229-243. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.02.045>
- [12] T.G. Theodosiou, A.M. Papadopoulos. The impact of thermal bridges on the energy demand of buildings with double brick wall constructions. *Energy and Building* 2008;40:2083-9. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2008.06.006>
- [13] V. Corrado, A. Gorrino, A. Gasparella, F. Cappelletti. Detailed assessment of thermal bridges in highly insulated buildings. In: *Clima 2010, 10th Rehva World Congress "Sustainable Energy Use in Buildings"*, Antalya, 9-12 May, 2010.
- [14] G. Evola, G. Margani, L. Marletta. Energy and cost evaluation of thermal bridge correction in Mediterranean climate. *Energy and Buildings* (2011) 43:2385-93. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.05.028>

-
- [15] Hua Ge, Fuad Baba. Effect of dynamic modeling of thermal bridges on the energy performance of residential buildings with high thermal mass for cold climates. *Sustainable Cities and Society* 34 (2017) 250-263. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.06.016>
- [16] C. Misiopceki, M. Bouquin, A. Gustavsen, B. P. Jelle. Thermal modeling and investigation of the most energy-efficient window position. *Energy and Buildings* 158 (2018) 1079-1086 <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.10.021>
- [17] K Kuusk, J Kurnitski, T Kalamees. Calculation and compliance procedures of thermal bridges in energy calculations in various European countries. *Energy Procedia* 132 (2017) 27-32. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.626>
- [18] M. Citterio, M. Cocco and H. Erhorn-Kluttig. Thermal Bridges in the EPBD context: overview on MS approaches in regulations. ASIEPI information paper. 2008. https://www.buildup.eu/sites/default/files/P064_EN_ASIEPI_WP4_IP1_p3073.pdf
- [19] D1.1. Requirements and drivers of EENSULATE module. WP1 <https://ec.europa.eu/research/participants/documents/downloadPublic?documentIds=080166e5aeb8b494&appld=PPGMS>
- [20] Passive House Institute (PHI). Passive House Standard. https://passiv.de/en/02_informations/02_passive-house-requirements/02_passive-house-requirements.htm
- [21] Código Técnico de la Edificación. Documento Básico de Ahorro de Energía DB-HE, sus documentos de apoyo DA DB-HE/2 y DA DB-HE/3 y la Guía de Aplicación del DB-HE. <https://www.codigotecnico.org/DocumentosCTE/AhorroEnergia.html>
- [22] Ministerio de Transporte, Movilidad y Agenda Urbana <https://www.mitma.gob.es/vivienda>
- [23] En ISO 9972. Thermal performance of buildings. Determination of air permeability of buildings. Fan pressurization method. 2015
- [24] C.N. Bramiana, A.G. Entrop, J.I.M. Halman. Relationships between building characteristics and airtightness of Dutch dwellings. *Energy Procedia*. 96 (2016) 580 -591. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.09.103>
- [25] J. Šadauskienė, L. Šeduikytė, V. Paukštys, K. Banionis, A Gailius. The role of air tightness in assessment of building energy performance: Case study of Lithuania. *Energy for Sustainable Development* 32 (2016) 31 - 39. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2016.02.006>
- [26] Jésica Fernández-Agüera, Samuel Domínguez-Amarillo, Juan José Sendra, Rafael Suárez. An approach to modelling envelope airtightness in multi-family social housing in Mediterranean Europe based on the situation in Spain. *Energy and Buildings*. 128 (2016) 236 - 253. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.06.074>
- [27] Ricardo M.S.F. Almeida, Nuno M.M. Ramos, Pedro F. Pereira. A contribution for the quantification of the influence of windows on the airtightness of Southern European buildings. *Energy and Buildings*. 139 (2017) 174 - 185. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.01.012>
- [28] Atefeh Salehi, Isabel Torres, Ana Ramos. Experimental analysis of building airtightness in traditional residential Portuguese buildings. *Energy and Buildings*. 151 (2017) 198 - 205. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.06.037>
- [29] Goopyo Hong, Daeung Danny Kim. Airtightness of electrical, mechanical and architectural components in South Korean apartment buildings using the fan pressurization and tracer gas method. *Building and Environment*. 132 (2018) 21 - 29. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.01.024>
-

-
- [30] Jesús Feijó-Muñoz, Roberto Alonso González-Lezcano, Irene Poza-Casado, Miguel Ángel Padilla-Marcos, Alberto Meiss. Airtightness of residential buildings in the Continental area of Spain. *Building and Environment*. 148 (2019) 299 - 308. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.11.010>
- [31] Jésica Fernández-Agüera, Samuel Domínguez-Amarillo, Juan José Sendra, Rafael Suárez, Ignacio Oteiza. Social housing airtightness in Southern Europe. *Energy & Buildings*. 183 (2019) 377 - 391. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.10.041>
- [32] Jesús Feijó-Muñoz, Cristina Pardal, Víctor Echarri, Jéssica Fernández-Agüera, Rafael Assiego de Larriva, Manuel Montesdeoca Calderín, Irene Poza-Casado, Miguel Ángel Padilla-Marcos, Alberto Meiss. Energy impact of the air infiltration in residential buildings in the Mediterranean area of Spain and the Canary islands. *Energy & Buildings*. 188-189 (2019) 226 - 238. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.02.023>
- [33] Silvia Guillén-Lambea, Beatriz Rodríguez-Soria, José M. Marín. Air infiltrations and energy demand for residential low energy buildings in warm climates. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 116 (2019) 109469. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109469>.
- [34] Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL) THERM software. <https://windows.lbl.gov/software/therm>
- [35] US Department of Energy. Energy Efficiency and Renewable Energy Office, Building Technology Program, EnergyPlus software. <https://energyplus.net>
- [36] INE. Instituto Nacional de Estadística. <https://www.ine.es/>
- [37] Catálogo de Elementos Constructivos CEC del Código Técnico de la Edificación <https://www.codigotecnico.org/Programas/CatalogoElementosConstructivos.html>
- [38] EN ISO 10456:2007 Building materials and products - Hygrothermal properties - Tabulated design values and procedures for determining declared and design thermal values
- [39] EN ISO 10077-2:2017. Thermal performance of windows, doors and shutters. Calculation of thermal transmittance. Part 2: Numerical method for frames.
- [40] ETICS Forum 2017. The European ETICS market. Do ETICS sufficiently contribute meet political objectives?. European Association for External Thermal Insulation Composite Systems. https://www.ea-etics.eu/files/dokumente-eae/4_ETICS_Forum_ETICS_Forum_2017/06_European_ETICS_Forum_2017_European_ETICS_Market_Pasker_final_2017-10-03.pdf
- [41] Adell J.M., García-Santos A., Vega S., López-Hombrados C., Peña J., Timperman P. y Yáñez E. "Ensayos en dinteles de fábrica de ladrillo atirantada, sobre los nuevos apoyos PI, distanciados 6m entre sí". *Actas de las II Jornadas de Investigación en Construcción*. http://digital.csic.es/bitstream/10261/6240/1/IJIC_Adell.pdf
- [42] HALFEN brickwork support. <https://www.halfen.com/en/>
- [43] Factores de emisión de CO₂ y coeficientes de paso a energía primaria de diferentes fuentes de energía final consumidas en el sector de edificios de España. https://energia.gob.es/desarrollo/EficienciaEnergetica/RITE/Reconocidos/Reconocidos/Otros%20documentos/Factores_emision_CO2.pdf
- [44] CYPETHERM HE PLUS. CYPE Ingenieros. <http://cypetherm-he-plus.cype.es>
-

-
- [45] Irene Poza-Casado, Vitor E.M. Cardoso, Ricardo M.S.F. Almeida, Alberto Meiss, Nuno M., M. Ramos, Miguel Ángel Padilla-Marcos. Residential buildings airtightness frameworks: A review on the main databases and setups in Europe and North America. *Buildings and Environments*. 183 (2020) 107221. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107221>
- [46] Blower Door GmbH. TECTITE Express software. <https://www.blowerdoor.es/sistemas-de-medicion/blowerdoor-standard>
- [47] EN 15242. Ventilation for buildings. Calculation methods for the determination of air flow rates in buildings including infiltration.
- [48] EN 16798-7. Energy performance of building. Ventilation for buildings. Part 7: Calculation methods for the determination of air flow rates in buildings including infiltration (Modules M5-5)
- [49] Fabrizio Ascione, Nicola Bianco, Filippo de' Rossi, Gianluca Turni, Giuseppe Peter Valoni. Different methods for the modelling of thermal bridges into energy simulation programs: Comparisons of accuracy for flat heterogeneous roofs in Italian climates. *Applied Energy*. (2012) 405-418 <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.01.022>
- [50] Generador de precios de la construcción. CYPE Ingenieros <http://generadorprecios.cype.es>



 **Biblioteca** **ANEXO**
SEPARATA DE LOS ARTÍCULOS

Anexo: separata de los artículos

Los artículos publicados que sustentan esta investigación incluyen tanto los resultados como las contribuciones realizadas y se enmarcan dentro de revistas de impacto correspondientes al primer cuartil (Q1) del Journal Citation Reports (JCR Science Edition). A continuación se incluyen los artículo completos que sustentan esta investigación.

A. Analysis of design improvements for thermal bridges formed by double-brick façade and intermediate slabs for nZEB buildings in Spain.

Artículo 1

M.J. Romero, F. Aguilar, P. G. Vicente. *Analysis of design improvements for thermal bridges formed by double-brick façades and intermediate slabs for nZEB residential buildings in Spain.* Journal of Building Engineering 44 (2021) 103270. [5]

<https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103270>

Journal of Building Engineering

ISSN: 2352-7102. Editorial Elsevier Science BV

Factor de impacto:

- Categoría: Construction & Building Technology. JCR-SCI (2020): 5.318, Rank 13/67, Cuartil Q1
- Categoría: Engineering, Civil. JCR-SCI (2020): 5.318, Rank 13/137, Cuartil Q1



Analysis of design improvements for thermal bridges formed by double-brick façades and intermediate slabs for nZEB residential buildings in Spain

M.J. Romero^{a,b,*}, F. Aguilar^a, P.G. Vicente^a

^a Miguel Hernández University of Elche. Department of Mechanical and Energy Engineering, Avda. de la Universidad s/n, Edificio Innova, 03202, Elche, Alicante, Spain

^b ETRES Consultores, C/ Alfonso XII, 31, local 2, 03203, Elche, Alicante, Spain

ARTICLE INFO

Keywords:

Thermal bridge analysis
Junction of façades with intermediate slabs
nZEB indicators
Linear thermal transmittance
Energy efficiency in buildings

ABSTRACT

The traditional construction systems of façades in Spain give rise to a large number of thermal bridges. Designers do not attach importance to their impact on the energy demand of buildings. This effect is increased with the introduction of greater thicknesses of thermal insulation required by regulations. One of the thermal bridges that has the greatest impact on energy demand in residential buildings is the junction of façades with intermediate slabs (slab fronts), which becomes more significant as the number of floors in the building increases. This paper analyzes this type of thermal bridges and proposes two novel construction improvements that reduce their impact on energy demand, while maintaining traditional façade construction systems. Thermal bridges (traditional construction system and improved systems) have been analyzed through the value of the linear thermal transmittance using THERM software. EnergyPlus was used to carry out an analysis of annual energy efficiency indicators of nZEB dwellings in three Spanish cities: Alicante, Barcelona and Madrid. This study shows that the application of the two proposed novel constructive improvements allows reducing the value of the linear thermal transmittance of the thermal bridge between 20% and 63.4% and the heating demand between 16.1% and 22.6%.

1. Introduction

Climate change is one of the major problems of today's society and trying to mitigate its consequences is one of the main challenges we face. To achieve this, our efforts should be focused on reducing the energy consumption associated with human activity as much as possible, and on using renewable energy sources instead of fossil fuels.

According to data from the European Commission [1], buildings are responsible for 41% of the European Union's energy consumption, above transport and industry. In Spain, energy consumption in buildings represents 31.9% of the total, of which 18.3% corresponds to residential buildings and the remaining 13.6% to buildings in the tertiary sector. Likewise, the high consumption of buildings is mainly related to heating services (47% of residential energy consumption).

Article 9 of Directive 2010/31/UE, EPBD - Energy Performance of Buildings Directive [2], stipulates that Member States must ensure that all new buildings are nearly Zero Energy Buildings nZEB as of January 1,

2021. This directive does not provide a quantitative definition for nZEB buildings, therefore EN ISO 52000-1 [3] in Annex H, proposes the following four indicators for assessing energy performance in these buildings:

- First indicator. Energy needs. Related to energy demands for heating and cooling as well as the quality of the thermal envelope (insulation, windows, etc.), bioclimatic design, thermal inertia, zoning, weather conditions and the need to guarantee adequate indoor environmental conditions.
- Second indicator. Total primary energy use. Related to the performance of the building's technical systems (HVAC, DHW and lighting installations) characterized by the energy use.
- Third indicator. Non-renewable primary energy use without compensation between energy carriers or the effect of exported energy.
- Fourth indicator. Use of non-renewable primary energy with compensation

* Corresponding author. Miguel Hernández University of Elche. Department of Mechanical and Energy Engineering, Avda. de la Universidad s/n, Edificio Innova, 03202, Elche, Alicante, Spain.

E-mail address: manuel.romero@umh.es (M.J. Romero).

<https://doi.org/10.1016/j.job.2021.103270>

Received 6 July 2021; Received in revised form 3 September 2021; Accepted 5 September 2021

Available online 14 September 2021

2352-7102/© 2021 The Authors.

Published by Elsevier Ltd.

This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

Nomenclatures			
<i>Symbols</i>		U	Thermal transmittance of the façade [W/(m ² ·K)]
A_i	Area of component i of the thermal envelope of the building [m ²]	U_j	Thermal transmittance [W/(m ² ·K)] of component j separating two environments considered
C	Number of materials that make up a façade	U_i	Thermal transmittance [W/(m ² ·K)] of component i of the thermal envelope of the building
$f_{R_{si,min}}$	Minimum temperature factor at the internal surface	<i>Greek symbols</i>	
h_{si}	Inner surface film coefficient [W/(m ² ·K)]	Φ_l	Heat flux per linear meter of the thermal bridge [W/m]
h_{se}	Outer surface film coefficient [W/(m ² ·K)]	Φ_T	Conduction heat flow [W]
L_j	Length [m] within the two-dimensional geometrical model to which the value is applied U_j	θ_i	Indoor temperature [°C]
L_p	Length [m] of thermal bridge p of the thermal building envelope	θ_e	Outdoor temperature [°C]
L^{2D}	Thermal coupling coefficient for two dimensional calculation [W/m·K]	θ_{si}	Temperature at the internal surface [°C]
N	Number of components with one-dimensional heat flux	λ	Thermal conductivity of a material [W/(m·K)]
R_a	Thermal resistance of the façade thermal insulation [(m ² ·K)/W]	Ψ	Linear thermal transmittance of the linear thermal bridge separating two considered rooms [W/(m·K)]
R_{si}	Internal surface resistance [(m ² ·K)/W]	Ψ_e	Linear thermal transmittance [W/(m·K)] measured with the external dimension system
R_{se}	External surface resistance [(m ² ·K)/W]	Ψ_i	Linear thermal transmittance [W/(m·K)] measured with internal dimension system
t	Thickness of each material that makes up a façade [m]	Ψ_p	Linear thermal transmittance [W/(m·K)] of the thermal bridge p of the thermal envelope of the building

In the case of Spain, strategies for reducing energy demand include the use of thermal insulation thicknesses of 4–16 cm depending on the climate zone and the type of building element according to Ref. [4]. However, these thermal insulation thicknesses could be lower if a correct analysis and design of thermal bridges were carried out.

Thermal bridges (point and linear) that are generated at various points of the thermal envelope of buildings, are defined in the standard [5]. Several researchers have demonstrated the importance of thermal bridges in the analysis of the energy performance of buildings.

A. Capozzoli et al. [6], conducted an analysis of thirty-six types of linear thermal bridges found in the thermal envelope of buildings. From a building design point of view, the study emphasizes that in order to comply with the requirements of the EPBD [2], designers should pay attention to building design and in particular to thermal bridges as not acting on them will only reduce the one-dimensional heat flow and will not affect the two-dimensional heat flow that occurs at thermal bridges.

The study carried out by T. G. Theodosiou et al. [7] on a residential building in Greece with a typical double-brick façade construction, concludes that this type of façade is likely to generate a large number of thermal bridges. He indicates that the inclusion or not of the effect of thermal bridges in the design phase of the building affects its energy efficiency since the heating needs can be increased by 30% compared to those determined in the calculation without considering thermal bridges. He also points out that the inclusion or not of thermal bridges has little influence on the cooling demand.

V. Corrado et al. [8] carried out a study on a single-family house with three different cases of thermal insulation of the opaque portion of the thermal envelope: moderate (average U-value of 0.30 W/m²·K); well insulated (average U-value of 0.25 W/m²·K); and highly insulated (average U-value of 0.15 W/m²·K). In addition, he compares two types of façade: External Thermal Insulation Composite Systems ETICS and double-brick façade with intermediate thermal insulation. He concludes that, in the case of double-brick façade, the influence of thermal bridges on heating needs varies between 30% and 67% depending on the climatic zone (Milan and Rome) and the average U-value considered.

G. Evola et al. [9] evaluate the energy impact of thermal bridges and the economic viability of correcting them in buildings located in the Mediterranean. Two types of buildings are analyzed: terraced houses and semi-detached houses. The research shows that the correct treatment of thermal bridges is an effective way to reduce primary energy demand for heating but has little impact on cooling.

The research by H. Ge et al. [10] on a residential building in Canada provides a comparison between seven types of linear thermal bridges with two design levels: one called “poor” where there is no treatment of the linear thermal bridge and one called “improved” where there is a correct treatment of the linear thermal bridge. The study covers four cities in Canada. The improvement of thermal bridges in these cities reduces heating energy needs by 3.7%–5.5%.

The study carried out by Cezary Misiópecki et al. [11] indicates that thermal envelopes (façade walls, floors, roofs, etc.) with a high thermal resistance value, produce a more pronounced effect in thermal bridges due to their greater effect in energy losses, being responsible for 36% of total energy losses.

The definition of the linear thermal transmittance Ψ is described in the standard [5]. Depending on the dimension system used (length or internal or external dimension) of the thermal bridge, a different value of the linear thermal transmittance Ψ will be obtained, resulting in the internal linear thermal transmittance Ψ_i or external linear thermal transmittance Ψ_e .

The document published at the 11th Nordic Symposium on Building Physics [12] presents a review of the requirements for thermal bridges and building regulations in several European countries: France, Austria, Cyprus, Greece, Spain, Belgium, Estonia, Romania and Sweden. Most of these countries use tabulated values of linear thermal transmittance. The ASIEPI (Assessment and Improvement of the EPBD Impact) report [13] also presents a similar review which has been updated by the report [14].

The summary of the three previous reports is that there are only three countries in Europe (France, Czech Republic and Denmark) that have set a maximum value for the linear thermal transmittance of thermal bridges. In the remaining countries, thermal bridges are generally considered in the energy calculations but do not include a maximum permitted value. Table 1 shows the maximum values allowed in these three countries as well as for the Passive House standard [15].

In Spain, the document DB HE 2019 Application Guide [4] provides an assessment of the linear thermal bridge according to its internal linear thermal transmittance: correct 0.01–0.20 W/m·K; dangerous 0.20–0.50 W/m·K; deficient above 0.50 W/m·K.

In Spain, buildings are constructed without adequate treatment of thermal bridges, and it is common for the thermal insulation layer of the façades not to be continuous throughout the thermal envelope. In addition, it is also common that construction projects for new buildings

Table 1
Maximum permissible values of linear thermal transmittance in linear thermal bridges, W/(m·K).

Country	Location / Description	Required	Recommended	Notes
France	Façade junction with intermediate slabs			0.60
Denmark	Contour of heated floor foundations			0.40
	Façade junction with windows: windowsills, lintels and jambs			0.06
	Roof junction with skylights			0.20
Czech Republic	Type of junction	Required	Recommended	Recommended for passive houses
	Façade junction with any other element except windows	0.20	0.10	0.05
	Façade junction with windows: windowsills, lintels and jambs	0.10	0.03	0.01
	Passive House standard	The design of the building should be considered as "thermal bridge free". For this purpose, the maximum value of the external linear thermal transmittance should be less than:		

lack a detailed study of the treatment of thermal bridges. As demonstrated by the research mentioned above, this situation leads to an increase in energy needs and makes it difficult to achieve nZEB buildings.

It seems necessary, therefore, to propose improvement proposals aimed at reducing the effect of thermal bridges in new buildings in Spain in order to comply with the Spanish nZEB building regulations [4]. This being the aim of this research, adding that such improvement proposals should maintain the traditional construction system of the façade.

This paper develops a detailed study of the thermal bridges at the slab front. It analyzes the case of the junction of double-brick façades with intermediate slabs in which three types of slabs and five values of thermal transmittance of the façades are combined.

Two novel construction improvements are proposed to reduce the impact of thermal bridge on energy demand, while maintaining the traditional façade construction systems in Spain.

Thermal bridges (traditional construction system and improved systems) have been analyzed through the value of the linear thermal transmittance using THERM software [16]. EnergyPlus [17] was used to carry out an analysis of annual energy efficiency indicators of nZEB dwellings in three Spanish cities: Alicante, Barcelona and Madrid.

2. Material and methods

The cases analyzed and the constructive improvements proposed are identified below.

2.1. Thermal bridges in buildings

In Spain, the regulations that set the requirements for nZEB buildings [4], classifies linear thermal bridges into the following types of façade junctions with:

- TB1. Intermediate slabs. Slab fronts (with or without cantilever).
- TB2. Flat roofs (with or without parapet).
- TB3. External floors.
- TB4. Windows: TB4.1 windowsills; TB4.2 lintels and shutter boxes; TB4.3 jambs.
- TB5. Floors in contact with the ground.
- TB6. Other façade: external corners.
- TB7. Other façade: interior corners.
- TB8. Pillars. TB8.1 corner; TB8.2 integrated.

Fig. 1 shows a diagram of the above list of linear thermal bridges for better identification.

If we disregard the contribution of point thermal bridges, the conduction heat flow through the thermal envelope of buildings, between their indoor and outdoor environments, can be determined by Eq. (1), thus considering the superposition of the one-dimensional (U_i) and two-dimensional (Ψ_p) heat flow.

$$\varphi_T = \left(\sum U_i \cdot A_i + \sum \Psi_p \cdot L_p \right) \cdot (\theta_i - \theta_e) \quad (1)$$

The conductive heat flux generated by the two-dimensional

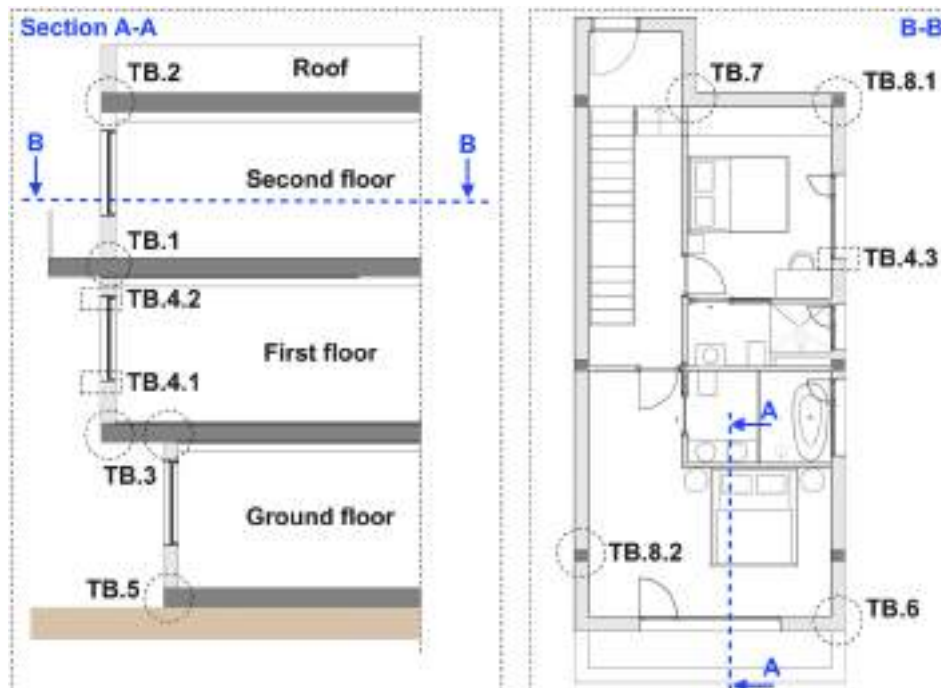


Fig. 1. Diagram for identification of linear thermal bridges types.

component of Eq. (1) is determined by the value of the linear thermal transmittance of the thermal bridge (ψ_p) and by its length (L_p). Consequently, increasing the length of a linear thermal bridge generates more heat flow.

Fig. 2 shows the result of the analysis carried out in this research, on the geometry of a typical Spanish residential building, setting some basic data to the average Spanish construction values, obtained from Ref. [18] (window size 1.5×1 m, 4 homes per floor, 80 square meters per home, etc.).

It is found that as the number of floors of a building increases, the types of thermal bridges that have greater length and consequently generate greater heat flow, ordered from highest to lowest, are:

- Junction of façades with intermediate slabs. Slab fronts (with or without cantilever).
- Junction of façades with windows: jambs.
- Junction of façades with pillars (corner or integrated).
- Junction of façades with openings: windowsills, lintels and shutter boxes.

The study presented in this paper focuses on the first group listed above: the junction of façades with intermediate slabs (slab fronts without cantilevers).

2.2. Linear thermal bridge of traditional façades with intermediate slabs

The traditional construction system in Southern Europe consists of double-brick façades with intermediate thermal insulation. There are also some cases in which ETICS external thermal insulation systems are used, but this type only represents 8% of the European market [19] or the ventilated façade system, which in Spain is used very little in residential buildings due to the difference in cost compared to the traditional double-brick system.

To further facilitate the understanding of the problem of energy losses generated in a thermal bridge of a slab front, Fig. 3 shows a thermographic analysis carried out in a building located in Ciudad Real (Spain) on a façade with a double-brick solution and one-way slab with ceramic hollow (whose case is analyzed in depth in this study). The study was carried out in winter and the images were taken at 10:20 in

the morning, with an outside ambient temperature of 12°C . Even when a ceramic cladding was placed to conceal the slab fronts, these are perfectly detected in the thermographic image since, through these slab fronts a greater heat flow is being produced, increasing the exterior surface temperature in this area as can be seen both by the color of the thermography and by the temperature variation graph.

In order to establish the thermal transmittance values to be considered in the façade, the reference for the lowest value was the Passive House standard [15] of $0.15 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ also used in the research of S. J. Chang et al. [20] and for the rest of the values the requirements for nZEB buildings in Spain [4] for the three cities under study. These values are shown in Table 2.

Fig. 4 shows the detail considered for the base case, showing the slab front with double-brick façades and the three types of slabs considered.

The properties of the material layers identified in Figs. 4, 5, 6 and 7 are described in Table 3. These properties have been obtained from the official document "Catalogue of Construction Elements CEC" [21]. These are design thermal values and include the effect of temperature and humidity according to ISO 10456 [22]. Unventilated air cavities are assigned to the predefined material in THERM [16], named as "Frame Cavity - CEN Simplified". This material will automatically calculate an "Equivalent Thermal Conductivity ETC" to the air gap according to EN ISO 10077-2 [23].

2.3. Thermal bridges with improved construction solutions

The Passive House Standard [15] sets the following design criteria to eliminate or minimize thermal bridges:

- Do not interrupt the thermal insulation layer in the thermal enclosure.
- Where the thermal insulation layer cannot be continued, the material that penetrates the thermal insulation layer must have the lowest possible thermal conductivity.
- At junctions, the layers of thermal insulation materials of the individual components must be completely and uninterruptedly connected to each other.

In addition, this research seeks that the proposed improvements

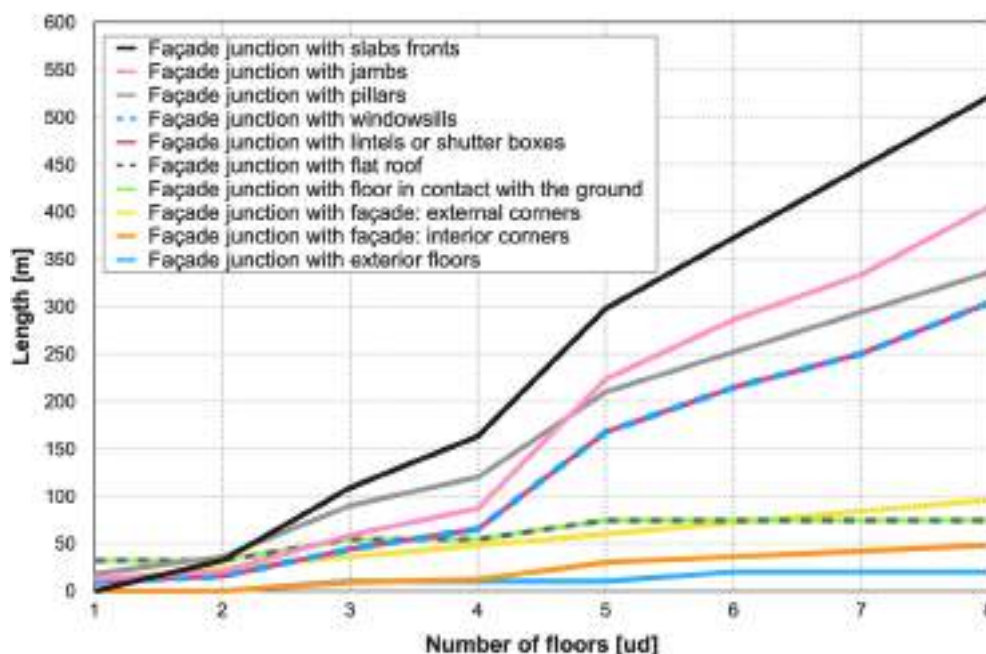


Fig. 2. Variation of the length of linear thermal bridges as a function of the number of floors of a typical Spanish residential building.

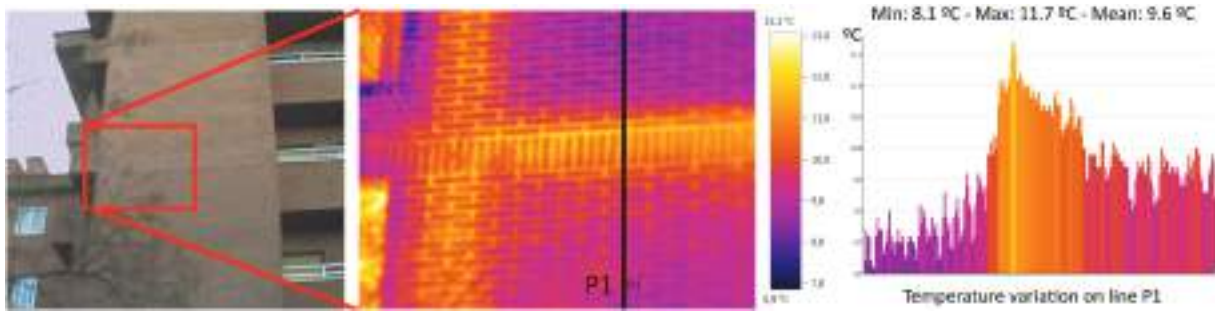


Fig. 3. Thermographic study carried out on double-brick façade.

Table 2

Thermal transmittance U values of the façade, thermal insulation thickness and types of floor slabs considered.

U -value of the façade $W/(m^2 \cdot K)$	Thermal insulation thickness with $\lambda = 0.034$ $W/m \cdot K$	Intermediate slabs
0.40	68 mm	FR. Waffle slab with concrete panels and 30 cm edge.
0.35	80 mm	FUC. One-way slab with ceramic hollow block and 30 cm edge.
0.30	96 mm	FUE. One-way slab with EPS hollow block and 30 cm edge.
0.25	119 mm	
0.15	210 mm	

The suggested U -value for façades to comply with the requirements of the nZEB building regulations in Spain [4], for the three cities under study is: Alicante 0.38 $W/(m^2 \cdot K)$; Barcelona 0.29 $W/(m^2 \cdot K)$; Madrid 0.27 $W/(m^2 \cdot K)$

allow to reach an interior linear thermal transmittance value lower than 0.60 $W/(m \cdot K)$ (maximum value allowed in France).

Following the above criteria, the following constructive improvements of the slab front thermal bridge have been designed:

M1 improvement: self-supporting facing brick façade, supported on a L-shaped stainless steel profile (130 × 130 mm sides and 4 mm thick) anchored to the slab front with screws (various manufacturers offer such profile and anchoring systems such as [24]) and a 40 mm thick layer of thermal insulation is placed between the ceramic brick and the slab

front. Fig. 5 shows a diagram of this improvement for the double-brick façades with waffle slabs (FR). These same improvements have also been applied to the rest of the FUC and FUE slabs. In addition, this figure shows a detail, obtained from the report [25], of a stainless steel profile model for face brick support with systems from the manufacturer Halfen-Deha SL [24].

M2 improvement: same as the previous case but also placing a 5 mm thick thermal insulation between the stainless steel profile and the slab front. The characteristics of the profile and its anchoring system are the same as in case M1; Fig. 6 shows a diagram of this improvement for double-brick façades with waffle slabs (FR). These same improvements have also been applied to the rest of the FUC and FUE slabs.

In both the M1 and M2 improvements, the stainless steel profile is anchored with bolts to the slab front. These bolts produce punctual thermal bridges that have not been considered in this study and are left for a future work.

M3 improvement: facing brick façade confined between the slabs, seeking to give continuity to the thermal insulation layer with three elements: replacement of the first line of floor slab lightning with expanded polystyrene EPS pieces; replacement of the first and last row of bricks of the inner ceramic sheet with cellular glass blocks; and placement, under the pavement and around its perimeter, of a thermal insulation layer 50 cm wide and 30 mm thick. For reasons of mechanical stability, it is not feasible to install thermal insulation in the slab front, as in cases M1 and M2, because there is constructively no space in the slab

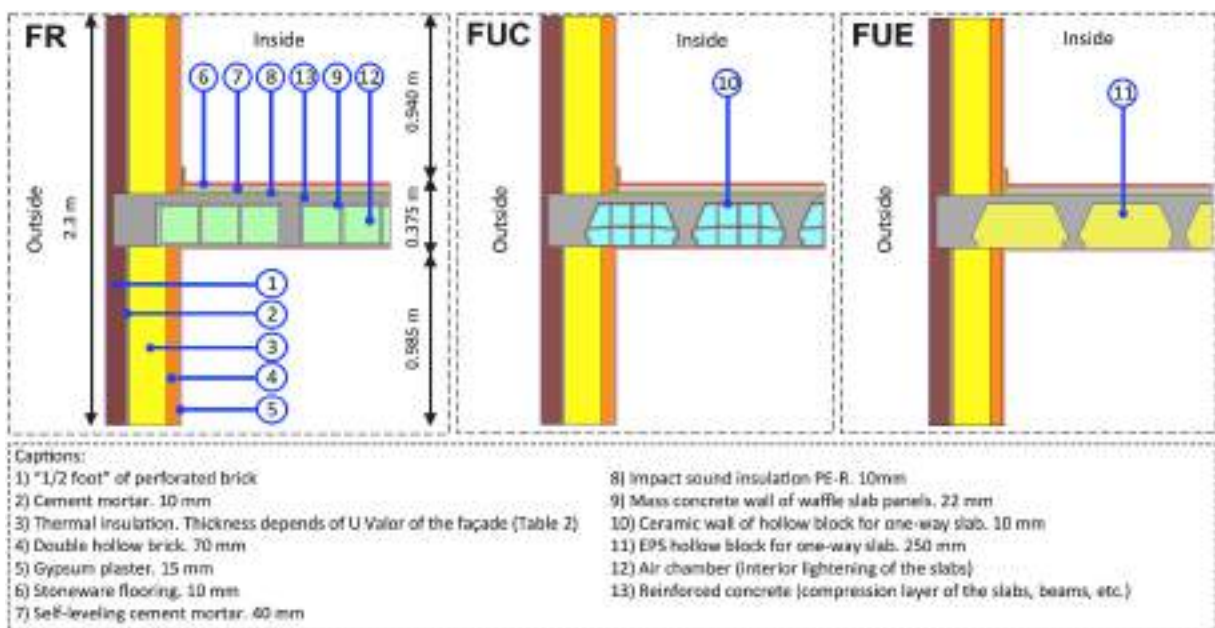


Fig. 4. Detail of the construction solution of the base case. Left with waffle slab (FR), center with one-way slab with ceramic vaults (FUC) and right with one-way slab with EPS vaults (FUE). Properties of the materials listed in Table 3.

Table 3
Properties considered for the materials.

ID	Material	Thickness mm	Thermal conductivity λ - W/(m·K)	Emissivity
1	"1/2 Foot" of perforated half brick	115	0.667	0.9
2	Cement mortar	10	0.550	0.9
3	Thermal insulation	Variable	0.034	0.9
4	Double hollow brick	70	0.432	0.9
5	Gypsum plaster	15	0.570	0.9
6	Stoneware flooring	10	2.300	0.9
7	Self-leveling cement mortar	40	0.550	0.9
8	Impact sound insulation, cross-linked polyethylene PE-R	10	0.046	0.9
9	Mass concrete wall of waffle slab panels	22	1.650	0.9
10	Ceramic wall of hollow block for one-way slab	10	1.000	0.9
11	EPS hollow block for one-way slab	250	0.046	0.9
12	Air chamber (interior lightning of the slabs)	variable	Frame cavity CEN	-
13	Reinforced concrete (compression layer of the slabs, beams, etc.)	50	2.500	0.9
14	Stainless steel profile	4	17.0	0.9
15	Cellular glass block	100 or 115	0.050	0.9

front to do so, as the outer facing brick is confined between the slabs.

Fig. 7 shows a diagram of this improvement for double-brick façades with waffle slabs (FR). These same improvements have also been applied to the rest of the FUC and FUE floors.

This improvement includes the use of cellular glass blocks to achieve continuity of thermal insulation, as this is a solution that is rarely used. Fig. 7 shows an image of the cellular glass block prepared for installation, with the aim of minimizing the thermal bridging of the contour of a flat roof, during the execution of a work in early 2021 in Elche (Spain) in the province of Alicante.

In Spain, seismic-resistant regulations do not require walls to be anchored to slabs or pillars. The cellular glass blocks have "European Technical Approval" for their use as support for brick masonry, guaranteeing their mechanical resistance.

It should be noted that only the M1 improvement is available as a standard solution on the Spanish market. The other solutions have been generated through this research. That is, while maintaining traditional

building solutions, a number of materials (cellular glass blocks, insulation behind the metal support profile of the external brick, expanded polystyrene lightning, etc.) have been incorporated to reduce the heat flow in the thermal bridge and thus reduce its linear thermal transmittance.

The geometry definition of the slabs considered in this research includes the solid concrete zones at the supports. In addition, the use of lightning elements (concrete, ceramic or EPS) are common in the Spanish market and are included in the Spanish Structural Concrete Instruction EHE-08 [26]. On the other hand, EPS lightweight elements have been used in slab construction since at least 1980. There are patented systems such as the Forel System [27], which consists of EPS molded pieces with a continuous EPS board on the underside of the slab's resistant elements (beams, edge beams, etc.). Therefore, it is considered that the solutions provided in this research do not reduce the structural capacity of the slabs.

3. Calculation

This research has been developed through the following steps:

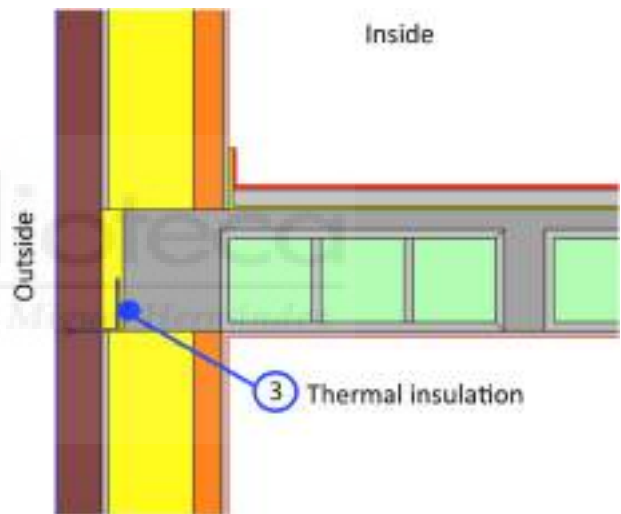


Fig. 6. M2 improvement considered to reduce the thermal bridge of waffle slab fronts. Properties of the materials listed in Table 3 (the rest of the layers coincide with those indicated in Fig. 4).

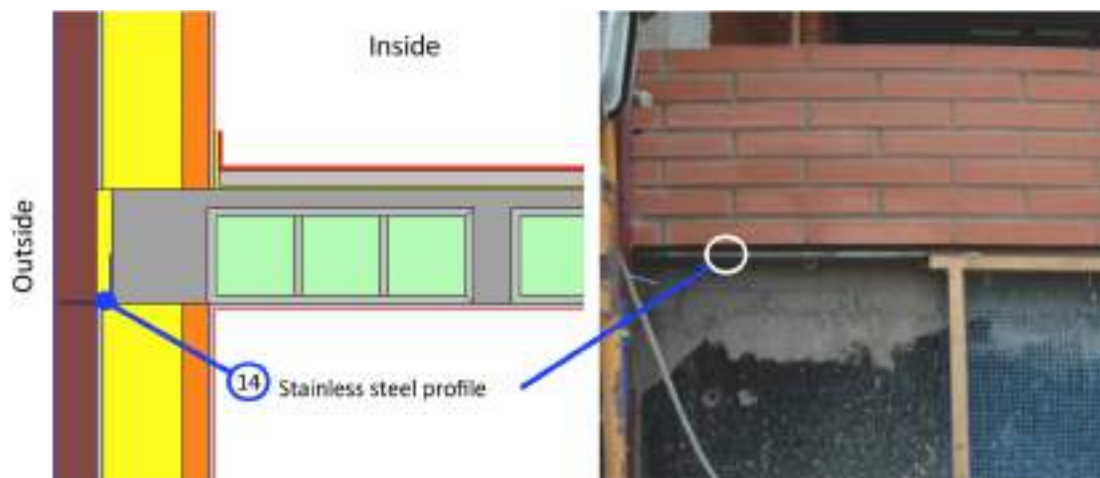


Fig. 5. M1 improvement considered to reduce the thermal bridge of waffle slab fronts. Properties of the materials listed in Table 3 (the rest of the layers coincide with those indicated in Fig. 4). Left: diagram of the M1 improvement. Right: detail of the stainless steel profile.

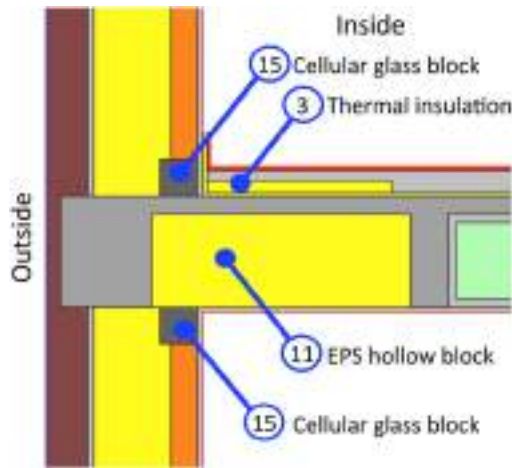


Fig. 7. M3 improvement considered to reduce the thermal bridge of waffle slab fronts. Properties of the materials listed in Table 3 (the rest of the layers coincide with those indicated in Fig. 4). Left: diagram of the M3 improvement. Right: detail of the cellular glass block.

- a) Definition and characterization of the linear thermal bridging of the slab front with double-brick façades (base case);
- b) Definition and characterization of improvements to achieve an indoor linear thermal transmittance value lower than 0.60 W/(m·K) (trying to design at least three cases of improvement that comply with this value);
- c) Energy simulation of a residential building, to determine the impact of linear thermal bridging in terms of energy demand, total primary and non-renewable energy consumption, CO₂ emissions and cost overrun to reduce one tonne of CO₂ by year;
- d) Comparison of the results obtained (baseline and improvements) and validation by comparison with official or reference values.

Fig. 8 shows the scheme followed for the development of this research. An iterative process has been carried out with the aim of finding those improvements that allow reaching a value of linear thermal transmittance within the thermal bridge of the slab front lower than 0.60 W/(m·K) (maximum value allowed in France), although in this paper, only the improvements that meet the criterion are shown. The generation of possible improvements has been done manually by designing possible solutions that give as much continuity as possible to

the thermal insulation layer. The value of the linear thermal transmittance was then determined, as described in section 3.1, checking if it is less than 0.60 W/(m·K) or not.

In addition, the risk of surface condensation and mold growth in the area of the thermal bridge has been analyzed.

3.1. Determination of linear thermal transmittance and risk of condensation

The heat flux and the linear thermal transmittance of a thermal bridge can be determined by two methods: (i) using detailed methods that employ specific calculation software applying EN ISO 10211 [5]; (ii) using simplified methods that employ thermal bridge catalogues or the values given in EN ISO 14683 [28]. The equivalent wall method for thermal bridges proposed in studies [29,30] can also be used.

In this research, the detailed method has been used applying the EN ISO 10211 standard [5], for which different software tools are available for the finite element evaluation of the energy behavior of linear thermal bridges. The ASIEPI report P198 [31] provides a list and characteristics of the software frequently used in Member States. In our case, we will use the THERM [16] software in its version 7.7.10 (released on

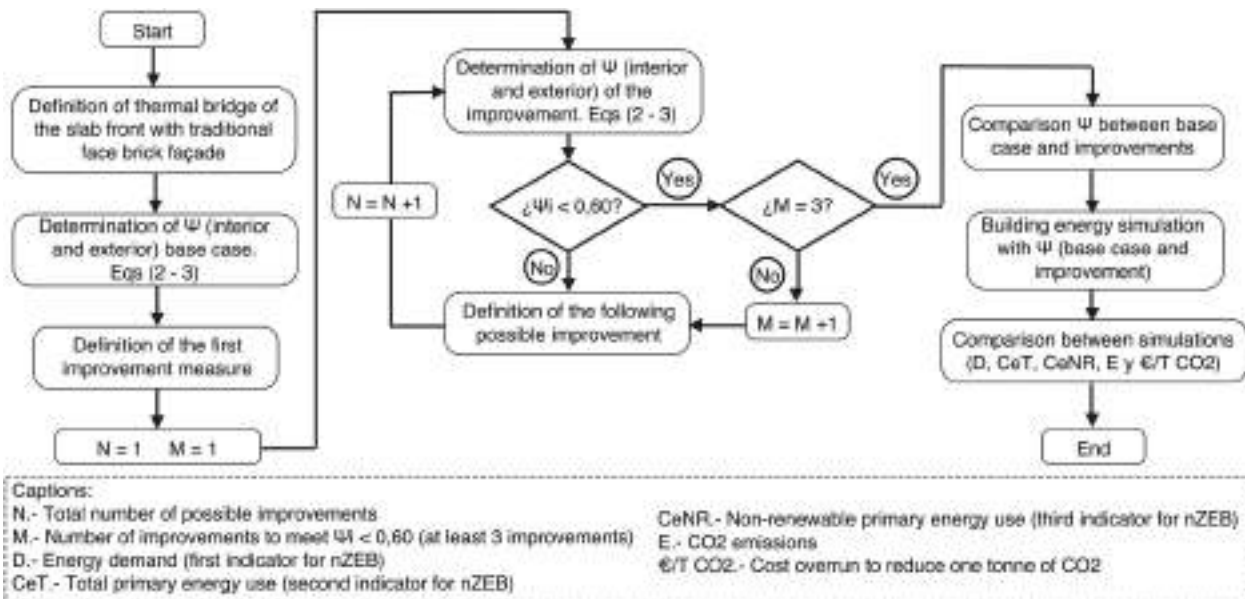


Fig. 8. Flow chart used for the evaluation of the thermal bridge of the slab front with double-brick façades and its possible improvements.

Table 4
Boundary conditions considered for slab front linear thermal bridges to be used in THERM.

Temperatures		Surface resistance		Film coefficient	
θ_e External	0°C	R_{se} External	0.04 (m ² K)/W	h_{se} External	25 W/(m ² K)
θ_i Interior	20°C	R_{si} Interior upward vertical flow	0.13 (m ² K)/W	h_{si} Interior upward vertical flow	7.69 W/(m ² K)

December 23, 2019, the latest version at the time of writing this article) which is also listed in the ASIEPI report [31].

THERM is a software for the evaluation of thermal bridges with a two-dimensional heat flow. Using the graphical interface, the detail of the thermal bridge to be evaluated is drawn (geometric model), the different materials that make up its construction elements are defined, the boundary conditions are defined and the simulation is launched.

The first step that THERM performs in the simulation is the generation of a mesh over the entire surface of the geometric model. This mesh is generated automatically through the "Finite Quadtree" algorithm and its operation is described in "Appendix C" of the THERM User Manual [16]. The mesh consists of a finite number of non-overlapping sub-regions, called elements, covering the whole region subject to analysis. When the mesh is created, THERM automatically sends it to the finite element solver called "Conrad".

Once the geometric model of the thermal bridge has been created in THERM, the materials that make up each construction solution have been defined according to Table 3 and the boundary conditions according to Table 4, the simulation is carried out with the software, thus obtaining the value of the heat flow ϕ_l per linear meter of the linear thermal bridge. This heat flow is obtained for both the interior and exterior dimensions of the thermal bridge.

From the heat flux, L^{2D} can be determined using Eq. (2). L^{2D} is the thermal coupling coefficient for the two-dimensional calculation and is expressed for the interior or exterior dimensions of the thermal bridge, depending on the heat flux used.

$$L^{2D} = \frac{\phi_l}{(\theta_i - \theta_e)} \quad (2)$$

Finally, the linear thermal transmittance Ψ of the thermal bridge is determined by Eq. (3). In the case of slab front linear thermal bridges, U_j represents the thermal transmittance of the façade and L_j represents the interior or exterior dimension of the façade at this linear thermal bridge. Depending on the dimension considered, the linear thermal transmittance inside (Ψ_i) or outside (Ψ_e) is obtained.

$$\Psi = L^{2D} - \sum_{j=1}^N U_j \cdot L_j = \frac{\phi_l}{(\theta_i - \theta_e)} - \sum_{j=1}^N U_j \cdot L_j \quad (3)$$

The thermal transmittance U_j of the façade is determined through Eq. (4) where R_{si} is the internal surface resistance, R_{se} is the external surface resistance (both obtained from Table 4), t_i and λ_i are respectively the thickness and thermal conductivity of each façade layer (both obtained from Table 3) and C is the number of layers forming the façade.

$$U_j = \frac{1}{(R_{si} + \sum_{i=1}^C \frac{t_i}{\lambda_i} + R_{se})} \quad (4)$$

The geometrical model considered in the definition of the linear thermal bridge to determine L^{2D} complies with the requirements of EN ISO 10211 [5] in the definition of the cutting planes, dimensions, etc.

The boundary conditions indicated in Table 4 are valid for southern European countries. In Central European countries, -10 °C is normally

used as the outside temperature and 30 °C as the temperature difference.

Applying the minimum interior surface temperature factor $f_{Rsi,min}$ indicated in Ref. [5] and the minimum value of this factor established in Spain in the document [4], it is obtained that the minimum temperature in the interior surface of the thermal bridge, so that surface condensation does not occur, is 12.8 °C. In this research it has been verified that, in the area of the thermal bridge, the interior surface temperature θ_{si} is always above this value.

3.2. Energy simulation

The EnergyPlus version 9.1 calculation engine was used to perform the energy simulation. EnergyPlus [17] is widely used in the scientific community to perform energy simulations of buildings. The energy simulation was carried out in three Spanish cities, Alicante, Barcelona and Madrid. For this purpose, EnergyPlus compatible climate data files were used, available at [17].

The results obtained are expressed in terms of energy demand, total primary energy consumption, total non-renewable primary energy consumption and greenhouse gas emissions CO₂.

These indicators have been determined using the efficiencies indicated in the Spanish legislation [4], being, for heating, a boiler with an efficiency of 92% and natural gas energy carrier, and for cooling, a refrigeration machine with an EER efficiency of 2.60 and electricity energy carrier. Likewise, the coefficients for primary energy consumption and CO₂ emissions correspond to those indicated in the Spanish standard [32].

As a complement, an economic analysis is carried out to obtain the extra construction cost required for each improvement measure to achieve a reduction of one tonne of CO₂ per year.

4. Results. Linear thermal transmittance of linear thermal bridges of slab front with face brick façades and the risk of condensation

The results obtained using the THERM software are shown below.

4.1. Base case: façades without any improvements implemented

Table 5 shows the results of both the heat flow per linear meter of thermal bridge and its linear thermal transmittance. The cases are shown classified according to the thermal transmittance value of the façades and the type of slab (FR for waffle slabs; FUC one-way slab with ceramic vault; FUE one-way slab with EPS vault), all according to the combinations shown in Table 2.

Comparison of the results shown in Table 5 reveal that the type of floor slab lightning has an influence on the reduction of heat flow. Slabs with concrete lightning will generate a higher heat flux. In floors with EPS lightning, the heat flow is lower and this reduction is more significant when the EPS lightning touches the thermal insulation of the façade, as there is a continuity in the thermal insulation layers reducing

Table 5

Base case. Results of the heat flow analysis for the case of unimproved façades.

BASE CASE			Inside dimensions			Outside dimensions		
Case	Façade		Φ_1 (W/m)	L^{2D} W/(m·K)	Ψ_i W/(m·K)	Φ_1 (W/m)	L^{2D} W/(m·K)	Ψ_e W/(m·K)
	U-value W/m ² ·K	Ra m ² ·K/W						
FR 40	0.40	2.00	35.692	1.785	1.015	35.692	1.785	0.865
FR 35	0.35	2.36	33.474	1.674	1.000	33.475	1.674	0.869
FR 30	0.30	2.83	30.995	1.550	0.972	30.995	1.550	0.860
FR 25	0.25	3.50	28.328	1.416	0.935	28.329	1.416	0.841
FR 15	0.15	6.16	21.377	1.069	0.780	21.377	1.069	0.724
FUC 40	0.40	2.00	33.628	1.681	0.911	33.628	1.681	0.761
FUC 35	0.35	2.36	31.255	1.563	0.889	31.254	1.563	0.758
FUC 30	0.30	2.83	28.696	1.435	0.857	28.696	1.435	0.745
FUC 25	0.25	3.50	25.900	1.295	0.814	25.900	1.295	0.720
FUC 15	0.15	6.16	18.616	0.931	0.642	18.616	0.931	0.586
FUE 40	0.40	2.00	29.948	1.497	0.727	29.948	1.497	0.577
FUE 35	0.35	2.36	27.371	1.369	0.695	27.371	1.369	0.564
FUE 30	0.30	2.83	24.616	1.231	0.653	24.616	1.231	0.541
FUE 25	0.25	3.50	21.640	1.082	0.601	21.640	1.082	0.507
FUE 15	0.15	6.16	13.773	0.689	0.400	13.773	0.689	0.344

Note: The numerical value indicated in each case represents the U-value of the façade.

the non-insulating areas.

This is clearly shown in Fig. 9 where zones with the same magnitude of heat flow are compared, while maintaining the same type of façade and its thermal transmittance (U-value 0.15 W/m²·K) with the three types of floor slabs (FR 15 waffle slab with concrete vault, FUC 15 one-way slab with ceramic vault and FUE 15 one-way slab with EPS vault). It

is clearly shown how, in the case of FUE 15, the first line of lightning touches the insulation of the façade and displaces the heat flow towards the compression layer of the slab. The approach is based on the premise of making improvements by giving continuity to the thermal insulation layer.

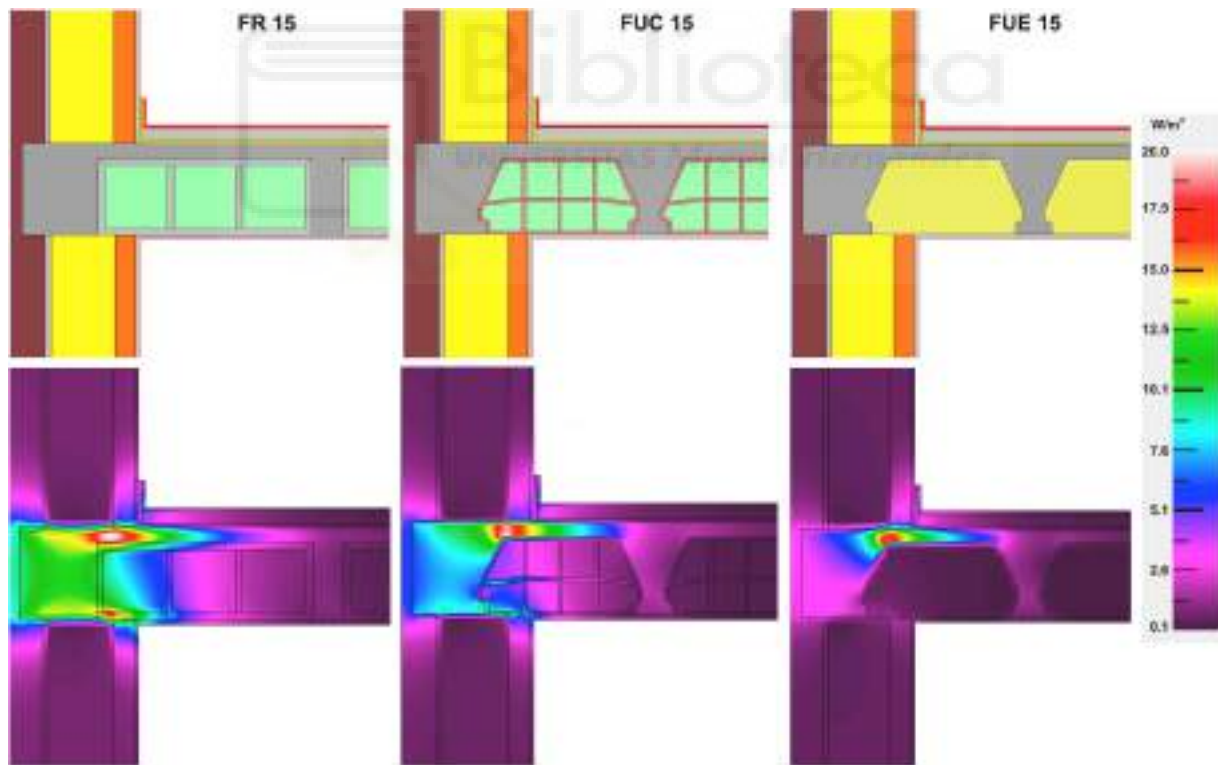


Fig. 9. Comparison of the zones with the same magnitude of heat flow for three different slabs. Slabs with concrete lightning (left) show a higher heat flux. In the EPS-lightened slabs (right) there is a reduction in heat flow because the EPS vault “touches” the thermal insulation of the façade.

4.2. Improvement M1: self-supporting brick façade with non-insulated support

Table 6 provides the results of both the heat flux per meter of the thermal bridge and its linear thermal transmittance.

As there is a practically continuous layer of thermal insulation on the façade, one might think that the result would be similar to the solution with the ETICS system, but the analysis carried out has shown that this is not the case, and this is due to the existence of a stainless steel profile for the support of the outer brick of the façade that is anchored to the slab front. Fig. 10 shows a detail of the slab front and the areas with the same magnitude of heat flow for case FR 15, where the increase in heat flow in the area of the stainless steel profile can be clearly seen, even though this

profile is only 4 mm thick.

To further investigate the effect of the stainless steel support profile, a comparison of case FR 15, with and without a profile, has been made. The heat flux goes from 15.09 W/m if the profile is included to 10.57 W/m if the profile is not included, a difference of 30%. This shows that in order to reduce the heat flow in this type of façade, it is necessary to act on the stainless steel support profile of the face brickwork and that is why this analysis has been carried out.

Finally, for case FR 15 with stainless steel support profile, an analysis of the variation of the heat flux with increasing thickness of thermal insulation at the slab front has also been carried out. Table 7 shows this analysis, in which it can be seen that the decrease in heat flow is very small, and this is due to the fact that increasing the thickness of the

Table 6

Case M1. Results of the heat flow analysis for the case of face façades with improvement M1. The % column indicates the improvement regarding the base case in terms of linear thermal transmittance.

IMPROVEMENT CASE (M1)			Inside dimensions				Outside dimensions			
Case	Façade		Φ_1 (W/m)	L^{2D} W/(m-K)	Ψ_i W/(m-K)	%	Φ_1 (W/m)	L^{2D} W/(m-K)	Ψ_e W/(m-K)	%
	U-value W/m ² ·K	Ra m ² ·K/W								
FR 40	0.40	2.00	25.338	1.267	0.497	51.0	25.338	1.267	0.347	58.9
FR 35	0.35	2.36	23.295	1.165	0.491	50.9	23.295	1.165	0.360	58.6
FR 30	0.30	2.83	21.493	1.075	0.497	48.9	21.493	1.075	0.385	55.3
FR 25	0.25	3.50	19.509	0.975	0.494	47.2	19.509	0.975	0.400	52.4
FR 15	0.15	6.16	15.086	0.754	0.466	40.3	15.086	0.754	0.409	43.5
FUC 40	0.40	2.00	25.089	1.254	0.484	46.9	25.089	1.254	0.334	56.1
FUC 35	0.35	2.36	23.037	1.152	0.478	46.2	23.037	1.152	0.347	54.2
FUC 30	0.30	2.83	21.066	1.053	0.476	44.5	21.066	1.053	0.363	51.3
FUC 25	0.25	3.50	19.182	0.959	0.478	41.3	19.182	0.959	0.384	46.7
FUC 15	0.15	6.16	14.611	0.731	0.442	31.2	14.611	0.731	0.386	34.2
FUE 40	0.40	2.00	24.636	1.232	0.462	36.5	24.636	1.232	0.312	46.0
FUE 35	0.35	2.36	22.557	1.128	0.454	34.7	22.556	1.128	0.323	42.7
FUE 30	0.30	2.83	20.540	1.027	0.450	31.2	20.540	1.027	0.337	37.7
FUE 25	0.25	3.50	18.571	0.929	0.447	25.5	18.571	0.929	0.354	30.3
FUE 15	0.15	6.16	13.465	0.673	0.384	3.9	13.464	0.673	0.328	4.5

Note: The numerical value indicated in each case represents the U-value of the façade.

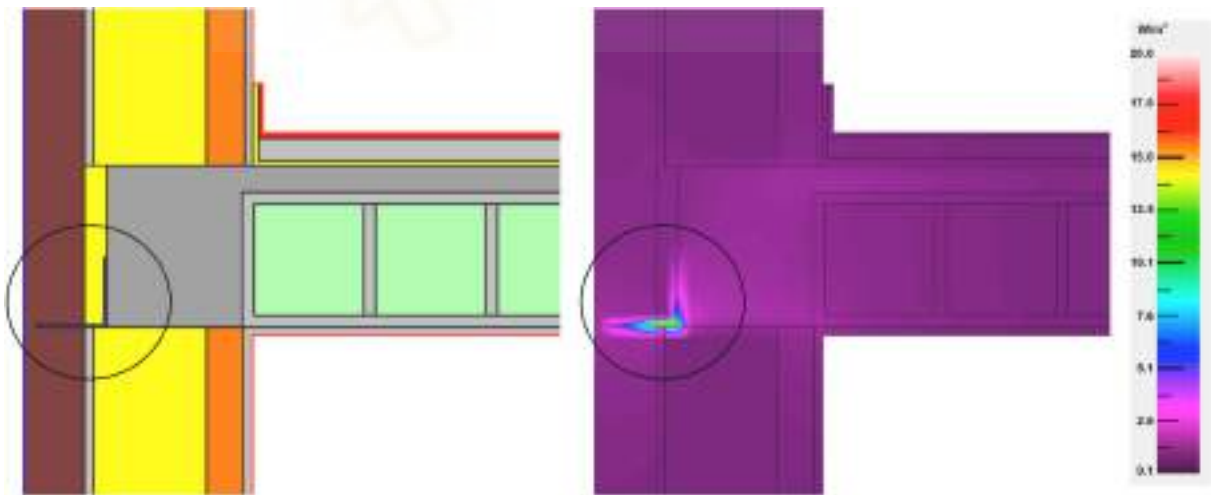


Fig. 10. Zones with the same magnitude of heat flux. Detail of the effect of the stainless steel support profile for the M1 FR 15 case. (Left model with materials. Right model with zones having the same heat flux).

Table 7

Dependence of the heat flow with the thickness of the thermal insulation at the slab front of case M1 FR 15.

Case	Thickness of thermal insulation at the slab face [mm]	Inside dimensions			Outside dimensions		
		Φ_1 (W/m)	L^{2D} W/(m-K)	Ψ_i W/(m-K)	Φ_1 (W/m)	L^{2D} W/(m-K)	Ψ_e W/(m-K)
FR 15	40 (original case)	15.086	0.754	0.466	15.086	0.754	0.409
	60	14.108	0.705	0.416	14.108	0.705	0.360
	80	13.337	0.667	0.378	13.337	0.667	0.322

thermal insulation requires the use of larger and thicker stainless steel profiles to support the facing brick, which will increase the effect shown in Fig. 10.

4.3. Improvement M2: self-supporting facing brick façade with insulated support

The analysis of case M1 shows that in order to reduce the heat flow in this type of façade, it is necessary to act on the stainless steel support profile of the facing brick. One solution could be to use non-metallic profiles, but as yet there are no solutions available on the market since it could compromise the mechanical stability of the façade. Therefore, the solution considered here involves introducing rigid thermal insulation (neoprene type or similar) between this profile and slab front, something similar to the “thermal bridge break” effect that exists in metal window frames.

In recent years, solutions without a continuous support profile have

appeared on the market, which is replaced by numerous point anchorages of the outer brick both in columns and slab fronts, which generates point thermal bridges and also limits the thickness of the thermal insulation to a maximum of 200 mm, which does not allow the minimum U-value analyzed in this study (U-value of 0.15 W/m²·K) to be reached. This is the reason why this solution has not been considered in this study.

Table 8 provides the results of both the heat flux per meter of the thermal bridge and its linear thermal transmittance.

4.4. Improvement M3: facing brick façade confined between slabs

Table 9 provides the results of both the heat flux per meter of the thermal bridge and its linear thermal transmittance.

The arrangement of the materials used in this improvement causes the heat flow to be displaced towards the compression layer of the slab. To analyze the possible improvement of the increase in the width of the

Table 8

Case M2. Results of the heat flow analysis for the case of face façades with improvement M2. The % column indicates the improvement regarding the base case in terms of linear thermal transmittance.

IMPROVEMENT CASE (M2)			Inside dimensions				Outside dimensions			
Case	Façade		Φ_1 (W/m)	L^{2D} W/(m·K)	Ψ_i W/(m·K)	%	Φ_1 (W/m)	L^{2D} W/(m·K)	Ψ_e W/(m·K)	%
	U-value W/m ² ·K	Ra m ² ·K/W								
FR 40	0.40	2.00	22.835	1.142	0.372	63.4	22.835	1.142	0.222	74.4
FR 35	0.35	2.36	21.005	1.050	0.377	62.4	21.005	1.050	0.245	71.8
FR 30	0.30	2.83	19.087	0.954	0.377	61.2	19.087	0.954	0.264	69.3
FR 25	0.25	3.50	17.188	0.859	0.378	59.6	17.188	0.859	0.284	66.2
FR 15	0.15	6.16	13.110	0.656	0.367	53.0	13.110	0.656	0.311	57.1
FUC 40	0.40	2.00	22.682	1.134	0.364	60.1	22.682	1.134	0.214	71.9
FUC 35	0.35	2.36	20.837	1.042	0.368	58.6	20.837	1.042	0.237	68.7
FUC 30	0.30	2.83	18.928	0.946	0.369	57.0	18.929	0.946	0.256	65.6
FUC 25	0.25	3.50	16.986	0.849	0.368	54.8	16.986	0.849	0.274	61.9
FUC 15	0.15	6.16	12.869	0.643	0.355	44.8	12.869	0.643	0.298	49.1
FUE 40	0.40	2.00	22.398	1.120	0.350	51.9	22.398	1.120	0.200	65.4
FUE 35	0.35	2.36	20.530	1.026	0.353	49.2	20.530	1.027	0.222	60.7
FUE 30	0.30	2.83	18.591	0.930	0.352	46.1	18.591	0.930	0.240	55.7
FUE 25	0.25	3.50	16.594	0.830	0.348	42.0	16.594	0.830	0.255	49.8
FUE 15	0.15	6.16	12.097	0.605	0.316	21.0	12.097	0.605	0.260	24.4

Note: The numerical value indicated in each case represents the U-value of the façade.

Table 9

Case M3. Results of the heat flow analysis for the case of face façades with improvement M3. The % column indicates the improvement regarding the base case in terms of linear thermal transmittance.

IMPROVEMENT CASE (M3)			Inside dimensions				Outside dimensions			
Case	Façade		Φ_1 (W/m)	L^{2D} W/(m·K)	Ψ_i W/(m·K)	%	Φ_1 (W/m)	L^{2D} W/(m·K)	Ψ_e W/(m·K)	%
	U-value W/m ² ·K	Ra m ² ·K/W								
FR 40	0.40	2.00	26.315	1.316	0.554	45.4	26.315	1.316	0.396	54.2
FR 35	0.35	2.36	23.683	1.184	0.517	48.3	23.682	1.184	0.379	56.4
FR 30	0.30	2.83	19.776	0.989	0.417	57.1	19.776	0.989	0.299	65.3
FR 25	0.25	3.50	17.146	0.857	0.381	59.3	17.146	0.857	0.282	66.5
FR 15	0.15	6.16	11.755	0.588	0.302	61.3	11.755	0.588	0.243	66.5
FUC 40	0.40	2.00	25.658	1.283	0.521	42.9	25.658	1.283	0.363	52.3
FUC 35	0.35	2.36	22.231	1.112	0.445	50.0	22.231	1.112	0.307	59.4
FUC 30	0.30	2.83	19.761	0.988	0.417	51.4	19.761	0.988	0.298	60.0
FUC 25	0.25	3.50	17.379	0.869	0.393	51.7	17.379	0.869	0.294	59.2
FUC 15	0.15	6.16	12.173	0.609	0.323	49.7	12.173	0.609	0.264	55.0
FUE 40	0.40	2.00	25.616	1.281	0.519	28.7	25.616	1.281	0.361	37.5
FUE 35	0.35	2.36	22.190	1.110	0.443	36.3	22.190	1.110	0.305	46.0
FUE 30	0.30	2.83	19.718	0.986	0.414	36.6	19.718	0.986	0.296	45.3
FUE 25	0.25	3.50	17.333	0.867	0.390	35.0	17.333	0.867	0.292	42.4
FUE 15	0.15	6.16	12.116	0.606	0.320	20.0	12.116	0.606	0.261	24.1

Note: The numerical value indicated in each case represents the U-value of the façade.

Table 10

Influence of the width of the thermal insulation board under the screed in the case M3 FR 15.

Thermal insulation band width under the screed - cm	Ψ_i W/(m-K)	Ψ_e W/(m-K)
0	0.342	0.283
50	0.302 -11.70 %	0.243 -14.13 %
100	0.301 -11.99 %	0.242 -14.49 %

perimeter thermal insulation board under the screed, the analysis shown in Table 10 shows that there is a significant reduction if a 50 cm wide board is installed, but that the increase in width has an insignificant effect (going from 50 cm to 100 cm only reduces the interior linear thermal transmittance by 0.29% and the exterior by 0.36% compared to the case without the perimeter insulation board), that's why it's not interesting to increase the width of such insulation board.

Fig. 11 shows the position of the 30 mm thick thermal insulation board under the screed (yellow color). Left without thermal insulation under the screed, center with a 50 cm wide board and right with a 100 cm wide board.

4.5. Risk of condensation

THERM makes it possible to identify, once the simulation has been carried out, the temperature at each of the points of the model. In all cases, the point with the lowest interior surface temperature is at the vertex formed by the lower face of the slab and the façade, obtaining the temperatures shown in Table 11. All of them are above the minimum value of 12.8 °C, so there is no risk of condensation or mold formation.

5. Comparison and discussion of results

These comparisons and analysis of the results are presented in the following sections:

- Between the linear thermal transmittance values of the base case and the proposed improvements to identify which are more effective in reducing heat flow. The results obtained are also validated by comparing them with two official sources: the EN-ISO 14683 [28] standard and the DA DB-HE/3 paper [4].

Table 11

Minimum internal surface temperatures θ_{si} for each case analyzed.

Case	Base case	Improvement M1	Improvement M2	Improvement M3
FR 40	13.7	16.7	17.5	13.2
FR 35	13.8	16.8	17.5	16.7
FR 30	14.5	16.8	17.6	17.7
FR 25	15.0	16.9	17.6	18.2
FR 15	15.6	17.1	17.7	19.0
FUC 40	13.5	16.4	17.3	13.2
FUC 35	13.9	16.5	17.3	16.7
FUC 30	14.4	16.6	17.3	17.7
FUC 25	14.9	16.5	17.3	18.3
FUC 15	16.4	17.4	17.9	19.1
FUE 40	13.2	16.0	16.9	13.2
FUE 35	14.6	16.0	16.9	16.7
FUE 30	15.6	16.0	16.8	17.7
FUE 25	16.6	15.9	16.7	18.3
FUE 15	19.0	18.0	18.3	19.1

Note: The numerical value indicated in each case represents the U-value of the façade.

- Among improvement measures in terms of energy demand, total primary energy consumption, total non-renewable primary energy consumption, and emissions of greenhouse gases CO₂.

- And a final comparison in terms of the construction cost overrun required with each improvement measure to achieve a reduction of one tonne of CO₂ per year.

5.1. Comparison of indoor linear thermal transmittance values

As shown in Tables 8 and 9, the application of the two proposed new construction improvements, M2 and M3, allow reducing the value of the interior linear thermal transmittance of the thermal bridge between 20% and 63.4%.

Fig. 12 shows a comparison between the four situations analyzed: the base case and the three selected improvements.

As can be seen in Fig. 12 (first graph on the left) the type of lightweight (concrete, ceramic or EPS) used in the slabs influences the resulting value of the interior linear thermal transmittance, for example, for a façade U-value of 0.40 W/(m²-K) the linear thermal transmittance goes from 1.02 W/m-K (concrete lightning) to 0.91 W/m-K (ceramic lightning, reduction of 10.8%) and to 0.73 W/m-K (EPS lightning,

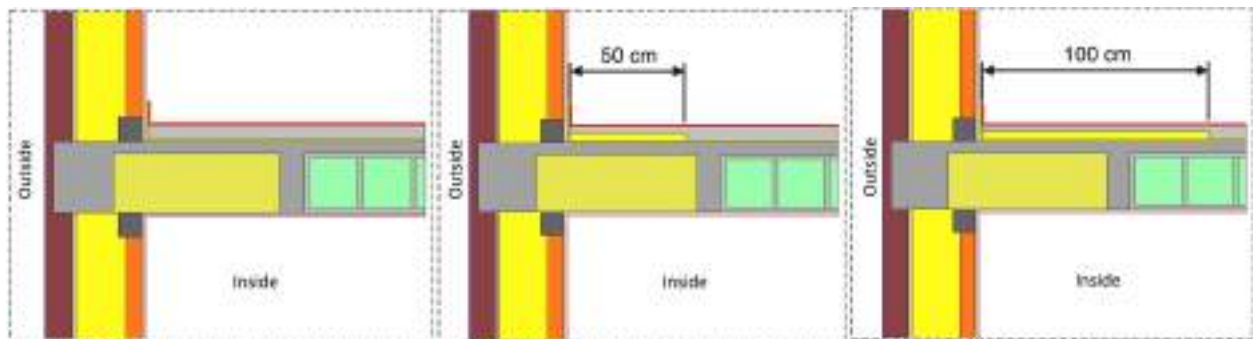


Fig. 11. Diagrams of the cases considered to analyze the effect of thermal insulation under the screed.

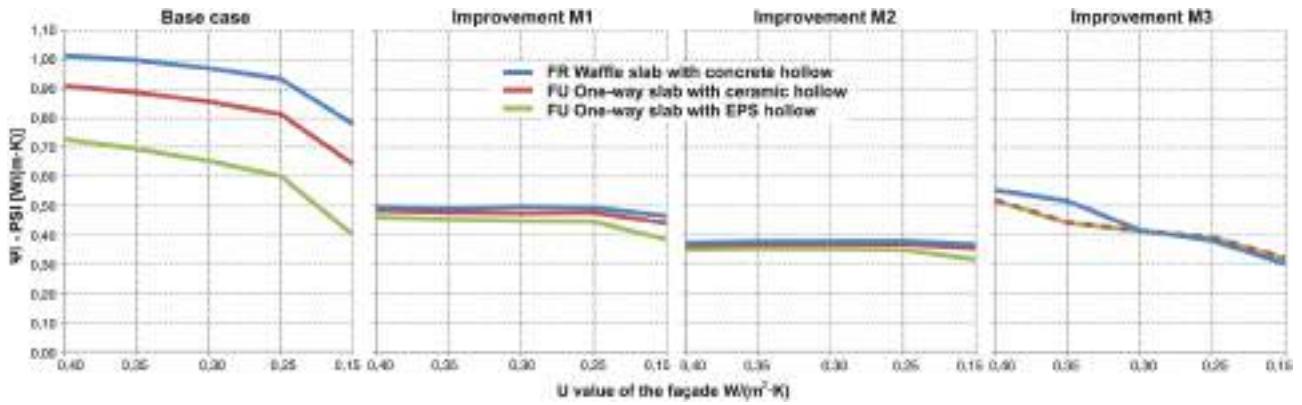


Fig. 12. Comparison between the analyzed cases of the indoor linear thermal transmittance Ψ_i .

reduction of 28.4%).

In the case of EPS lightweight slabs, due to the constructive arrangement of the materials, when the thickness of the thermal insulation layer of the façade increases, this touches the EPS lightning of the slab, achieving continuity in the thermal insulation materials.

In improvements M1 and M2, the continuity of the thermal insulation layer achieved at the slab front means that the value of the interior linear thermal transmittance remains very constant with a small change for a façade U-value of 0.15 W/(m²·K) due to the reduced gap between the façade insulation and the first slab lightning, also a thermal insulation material.

In case M3 there are two different behaviors: for façade U-values higher than 0.30 W/(m²·K), as there is no contact between the thermal insulation layer of the façade and the first lightning of the slabs (which is

made of EPS and is also a thermal insulating material), there is a difference depending on the type of slab. For façade U-values equal to or less than 0.30 W/(m²·K), as there is contact between the thermal insulation of the façade and that of the slab, there is no difference depending on the type of slab.

Fig. 13 shows the results of the temperature distribution analysis for the base case and the three proposed improvements. To facilitate the understanding of the figure, only the graphs corresponding to the maximum (0.40 W/m²·K) and minimum (0.15 W/m²·K) thermal transmittances for the façades and the three types of floor slabs are shown.

• In the base case, the effect of the thermal bridge and the temperature distribution in this area is clearly visible. The value of the linear

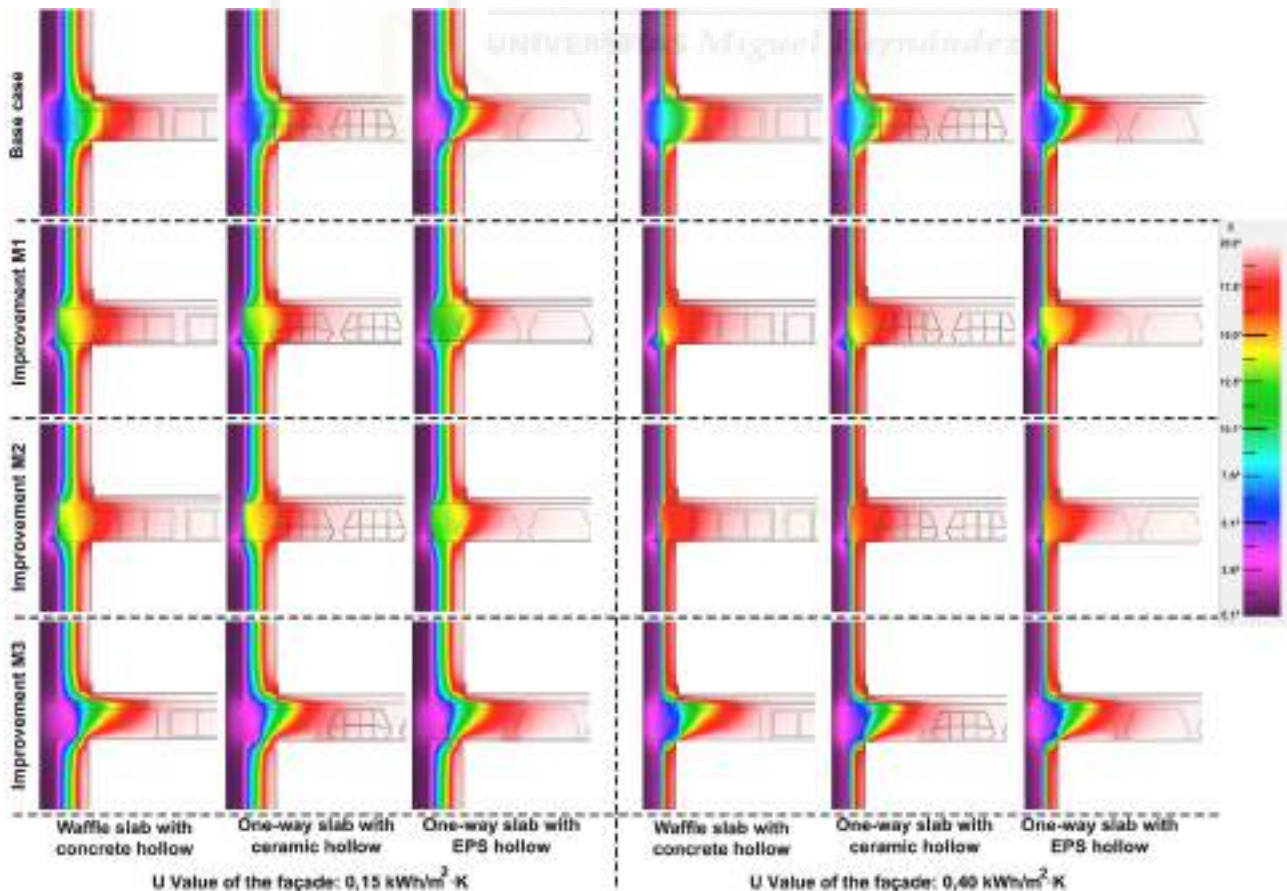


Fig. 13. Temperature distribution for the base case and proposed improvements.

Table 12Average values of the indoor linear thermal transmittance Ψ_i for the base case and the three proposed improvements.

			U-value of the façade - W/(m ² ·K)				
			0.40	0.35	0.30	0.25	0.15
Indoor linear thermal transmittance Ψ_i W/(m·K)	Base case	FR - Concrete	1.02	1.00	0.97	0.94	0.78
		FUC - Ceramic	0.91	0.89	0.86	0.81	0.64
		FUE - EPS	0.73	0.70	0.65	0.60	0.40
		Any type of slab	0.47				
	Improvements M1						
	Improvements M2						
	Improvements M3		0.47	0.42	0.39	0.31	

thermal transmittance of the thermal bridge is influenced by the type of slab, its lightning and the U -value of the façade.

•Improvements M1 and M2 show the effect of the thermal insulation layer on the left side of the façade: the temperature curves are shifted to the left, so that the value of the linear thermal transmittance of the thermal bridge is not influenced by the type of slab or its lightning, presenting constant values regardless of the U -value of the façade.

•Improvement M3 shows the effect of the thermal insulation layer on the right side of the façade: the temperature curves are shifted to the right. The value of the linear thermal transmittance of the thermal bridge is influenced by the U -value of the façade but not by the type of slab or its lightning if the U -values of the façade is equal to or less than 0.30 W/(m²·K).

Improvements M1 and M2 (self-supporting façade with thermal insulation at the slab front) show that the Ψ_i value of the interior linear thermal transmittance is little influenced by the U -value of the façade or the type of slab (waffle or one-way) or the type of slab light-weighting (concrete, ceramic or EPS). The Ψ_i value is very constant (in case M1 the variation between the maximum and minimum result is 0.097 W/m·K and in case M2 it is 0.111 W/m·K) and this is due to the fact that the continuity of the thermal insulation layer in the thermal bridge is achieved on the outside of the façade.

In the case of improvement M3 the continuity of the insulation layer in the thermal bridge is achieved on the inside of the façade and this means that the Ψ_i value is not constant, however the type of slab or light-weighting does not influence this value but it does influence it due to the U -value of the façade. Table 12 shows the average values of Ψ_i as a function of the U -value of the façade; these are the average values that can be taken as a result for this case.

In view of the above results, it is clear that the best solution is improvement M2 as it shows the lowest value of the indoor linear thermal transmittance.

The standard [28] or study [33] indicates the methods to determine the Ψ value and expected accuracy: numerical calculations according to EN ISO 10211 [5] (typical accuracy: \pm 5%), thermal bridge catalogues (typical accuracy: \pm 20%), manual calculations (typical accuracy: \pm 20%) and default values according to EN ISO 14683 [28] (typical accuracy between 0% and 50%). This is of interest for validation of the results by comparison with official or reference values.

Table 13 gives the values of Ψ_i of the two official references used (DA DB-HE/3 [4] and EN ISO 14683 [28]). In these references, there are no cases similar to the improvements proposed in this research (M1, M2

Table 13Values of Ψ_i of the two official references used.

Method and accuracy			U-value of the façade - W/(m ² ·K)				
			0.40	0.35	0.30	0.25	0.15
DA DB-HE/3 [4]	Catalogue \pm 20%	Ψ_i - W/(m·K)	0.89	0.86	0.83	0.79	0.69
EN-ISO 14683 [28]	Default values 0% a 50%	Ψ_i - W/(m·K)	1.05	No data			

and M3). It can be seen that the values obtained for the base case are in line with the reference values.

Official sources consider the slabs as a continuous layer of material without differentiating between the different materials (reinforced concrete, lightweight elements, air chambers, etc.), nor do they differentiate by type of slab (one-way, waffle) or by type of lightweight (concrete, ceramic or EPS). Furthermore, standard EN-ISO 14683 [28] only provides a linear thermal transmittance value obtained for slabs with a 20 cm edge and a façade U -value of 0.375 W/(m²·K). Finally, they only provide data for the base case.

Comparing the base case with the two reference sources we can see the following:

•The values of DA DB-HE/3 [4] are perfectly in line with the values obtained with the one-way slab with ceramic lightning.

•Given that the EN-ISO 14683 [28] standard uses a façade U of 0.375 W/(m²·K), we can see that the Ψ_i value provided by this standard is perfectly in line with the values obtained for waffle slabs with concrete panels and façade U -values of 0.40 or 0.35 W/(m²·K).

5.2. Effect of improved thermal bridge of the slab-front on nZEB indicators

In order to analyze the contribution of the thermal bridge of the slab-front to the evaluation of the nZEB building indicators, an energy simulation of a real model of a building of 18 dwellings located in Madrid (Spain) was carried out. Table 14 includes the distribution by use of each floor and the net useable area per dwelling.

Fig. 14 shows the model developed with the energy simulation tool and a real image of the building. The model has been developed using the CYPETHERM HE Plus tool [34] which incorporates EnergyPlus [17] as an energy engine.

In addition to Madrid, winter climate zone D according to Ref. [4], the study has been extended to two other Spanish cities: Alicante, winter climate zone B according to Ref. [4] and Barcelona, winter climate zone C according to Ref. [4]. According to statistics published by official Spanish agencies [18], these three climate zones (B, C and D) have 83.9% of the existing housing stock in Spain, 84% of the population and 82.5% of the total new construction of residential buildings. And if we focus on the three selected cities and their provinces, they are the ones with the highest number of newly built dwellings in Spain: Alicante with

Table 14

Floor layout of the building under study.

Use	Living area per dwelling (m ²)	Number of bedrooms
Basement	Garage	–
Ground floor	Circulation areas and facilities	–
Floors 1 to 3	4 dwellings per floor	89
Floors 4 to 5	2 dwellings per floor	96
Floors 6	2 dwellings per floor	84
Floors 7	Exit to roof	–



Fig. 14. Model developed in CYPETHERM HE Plus and the real building.

Table 15
Reference thermal transmittance U-values for the studied cities.

Locality, altitude and climate zone according to [4]			Reference U-values [W(m ² .K)]			
			Façades	Roof	External floor	Windows
Alicante	0 m	B4	0.38	0.33	0.38	2.00
Barcelona	13 m	C2	0.29	0.23	0.29	2.00
Madrid	667 m	D3	0.27	0.22	0.27	1.60

Table 16
Values of the interior linear thermal transmittance Ψ_i considered for the different thermal bridges of the building.

Type of façade encounters with:	Values Ψ_i [W/(m.L)] for thermal bridges		
	Alicante	Barcelona	Madrid
Roofs (without continuity of thermal insulation)	0.92	0.91	0.90
External floors (without continuity of thermal insulation)	0.83	0.83	0.83
External corners	0.07	0.06	0.06
Inside corners	-0.10	-0.08	-0.08
Windows: lintels (small gap between the insulation and the window frames)	0.72	0.75	0.77
Windows: jambs (small gap between insulation and window frames)	0.44	0.45	0.46
Windows: window sill (small gap between insulation and window frames)	0.16	0.17	0.17
Pillars (continuity of thermal insulation)	0.01	0.00	0.00

10.9%; Barcelona with 10.5% and Madrid with 27.1%. This is the reason why these three cities have been selected for this study. The same conditions of occupancy, ventilation and set point temperatures have been considered in all of them, which coincide with those indicated in Ref. [4].

The façade of the building is a double brick façade with no continuity of insulation on the slab fronts.

Table 15 shows the suggested values of the thermal transmittance U for each thermal envelope element according to Ref. [4].

Table 16 shows the interior linear thermal transmittance values of thermal bridges obtained from DA DB-HE/3 [4] by applying the U-values of Table 15. These values depend on the thermal transmittance value of the façades. The usual construction system in Spain has been considered in which thermal bridges are not improved.

Table 17 shows the interior linear thermal transmittance values considered for the slab front junctions. These values have been determined according to the façade U-value given in Table 14 and the

Table 17
Indoor linear thermal transmittance values Ψ_i considered for thermal bridge of slab front.

Case study		Values Ψ_i [W/(m.K)] for slabs fronts		
		Alicante	Barcelona	Madrid
Base case	Waffle slabs or one-way ceramic slabs	0.963	0.915	0.875
	One-way EPS slabs	0.727	0.653	0.601
Improvements M1	All types of slabs	0.481	0.474	0.473
Improvements M2		0.362	0.366	0.365
Improvements M3		0.531	0.416	0.388

corresponding Ψ_i values given in Tables 5, 6, 8 and 9, as indicated below. For the base case two values: the average value of the FR and FUC cases and the value of the FUE case; for each of the improvements, the average value of the FR, FUC and FUE cases of each improvement has been considered. In Alicante, the FR40, FUC40 and FUE40 cases have been used. In Barcelona the cases FR30, FUC30 and FUE30. In Madrid the cases FR25, FUC25 and FUE25.

Fig. 15 shows, for the base case and the residential building analyzed, a comparison among the different types of thermal bridges identified in Fig. 1 according to their impact represented by each of them in terms of the two-dimensional component of the heat flow indicated in Eq. (1). The thermal bridge formed by the junction of façades with intermediate slabs (slab front) represents more than 52% of the total heat flow through thermal bridges.

5.2.1. Study in alicante (climate zone B4)

Fig. 16 shows the comparison of the nZEB indicators between the base case and the three proposed improvements. In all cases, improvement M2 leads to the greatest reduction in these indicators: 22.6% in heating demand (first indicator); 20.4% in total primary energy consumption (second indicator); 20.7% in non-renewable primary energy consumption (third indicator) and 21.1% in CO2 emissions.

5.2.2. Study in Barcelona (climate zone C2)

Fig. 17 shows the comparison of the nZEB indicators between the base case and the three proposed improvements. In all cases, improvement M2 leads to the greatest reduction in these indicators: 18.5% in heating demand (first indicator); 15.5% in total primary energy consumption (second indicator); 16.0% in non-renewable primary energy

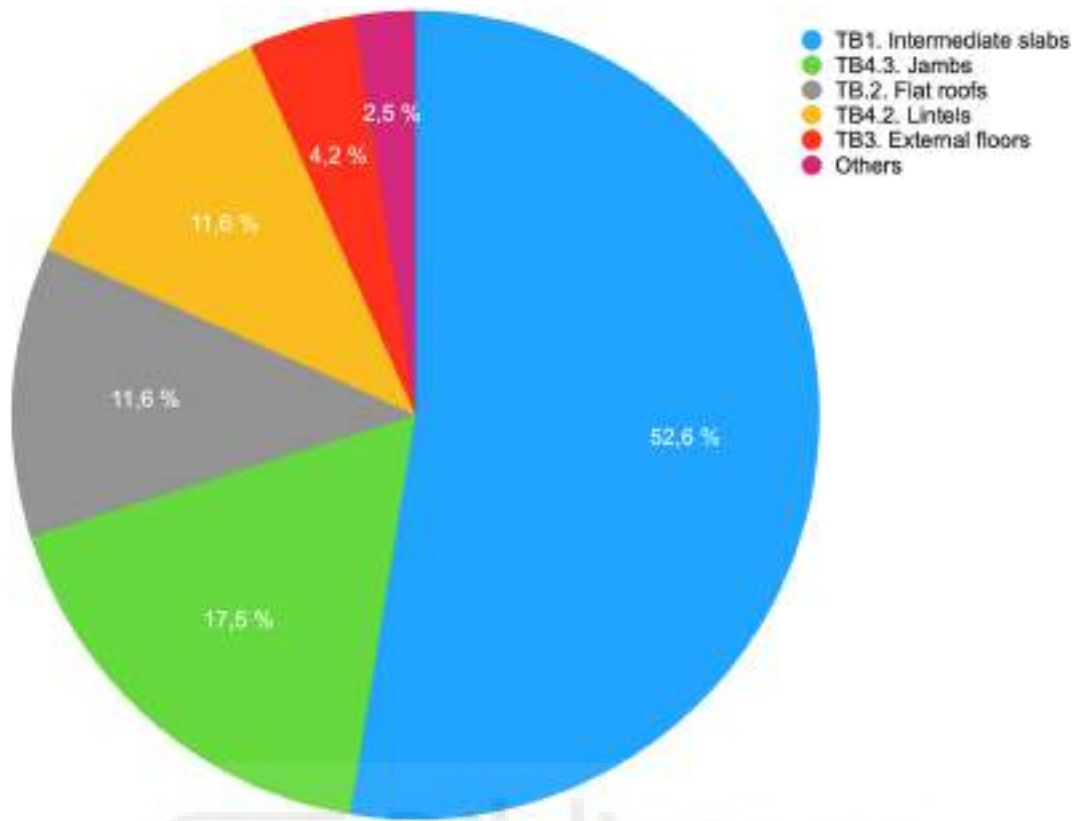


Fig. 15. Comparison between types of thermal bridges according to their contribution to the two-dimensional component of heat flow according to Eq. (1) in the base case of the building under study.

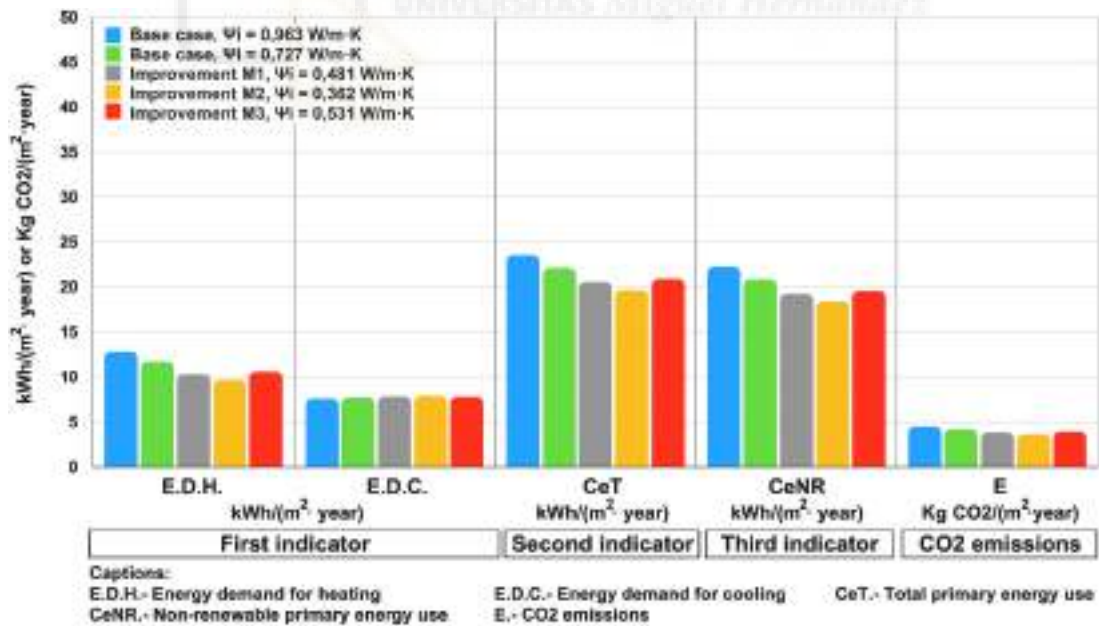


Fig. 16. Evolution of nZEB indicators for Alicante (climate zone B4). Base case comparison and improvements.

consumption (third indicator) and 16.4% in CO2 emissions.

5.2.3. Study in Madrid (climate zone D3)

Fig. 18 shows the comparison of the nZEB indicators between the base case and the three proposed improvements. In all cases, improvement M2 leads to the greatest reduction in these indicators: 16.1% in heating demand (first indicator); 14.4% in total primary energy

consumption (second indicator); 14.6% in non-renewable primary energy consumption (third indicator) and 14.9% in CO2 emissions.

As can be seen from the three figures above, in the three cities under study, it has been observed that the cooling demand remains practically unchanged, as already indicated by T. G. Theodosiou et al. [7] and G. Evola et al. [9].

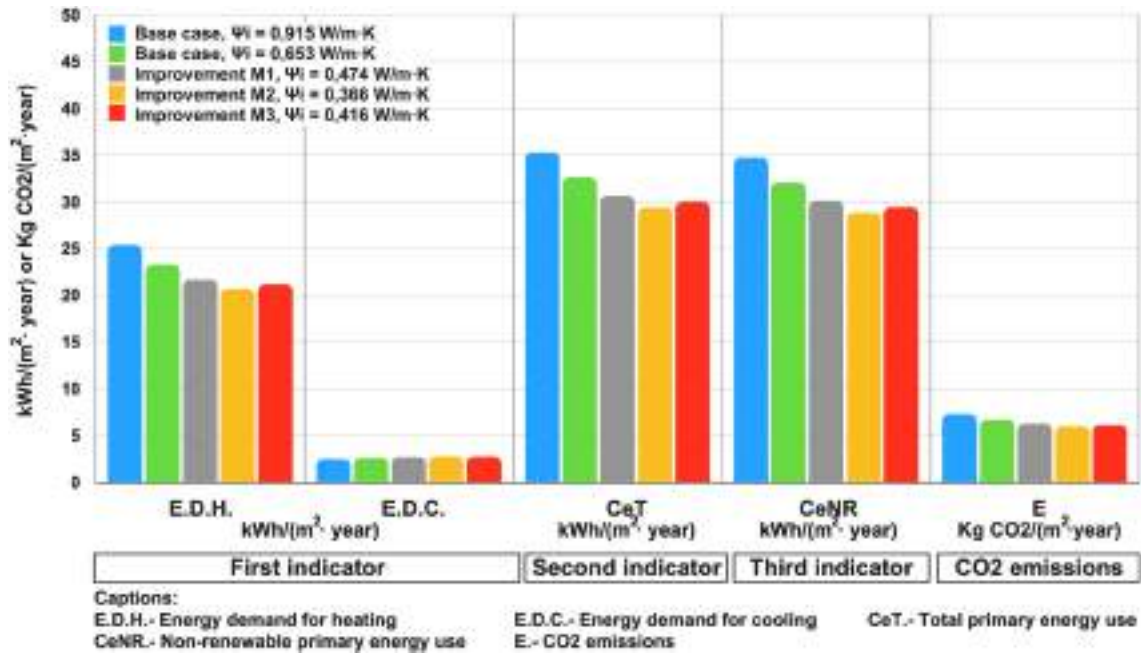


Fig. 17. Evolution of nZEB indicators for Barcelona (climate zone C2). Base case comparison and improvements.

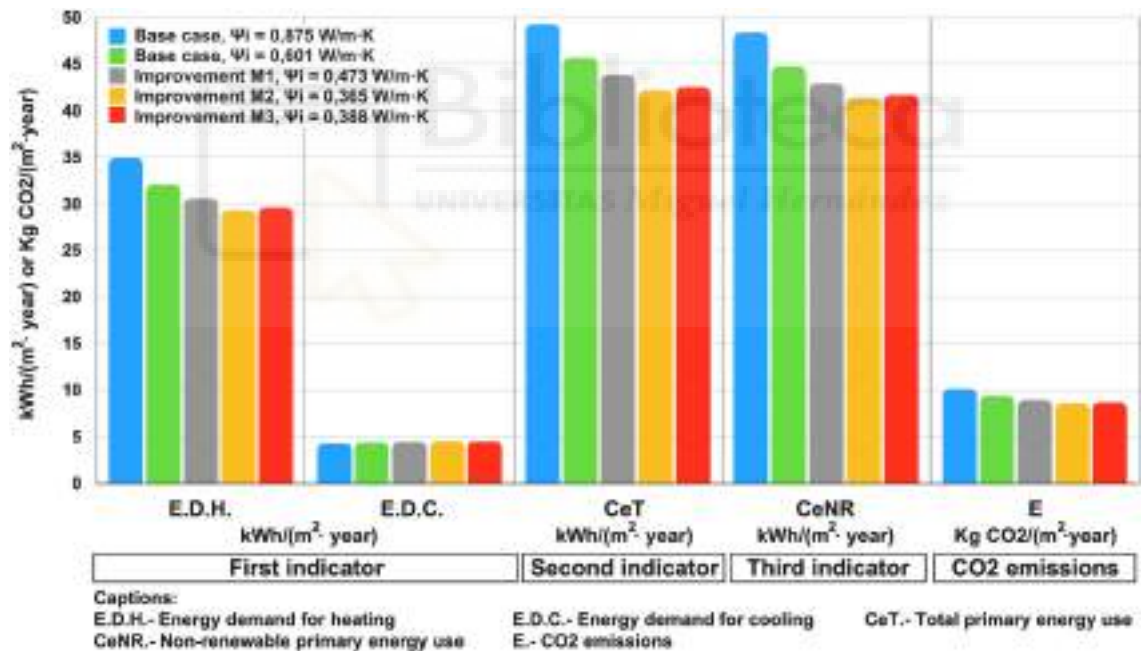


Fig. 18. Evolution of nZEB indicators for Madrid (climate zone D3). Base case comparison and improvements.

5.3. Analysis of the construction cost overrun required to reduce one tonne of CO₂ per year

In order to determine the construction costs of each case (base and improvements), the construction price base implemented in the software “Construction price generator” [35] has been used, which uses the reference prices of the professional associations of architects in Spain.

The indicator “additional cost to reduce one tonne of CO₂” allows to analyze improvement measures and to find out which is the easiest to implement from an economic point of view. In this way, decisions can be made on which improvement measures are the best strategy to reduce CO₂ emissions.

The analysis of this indicator is straightforward, as the improvement

measure with a lower value of the indicator implies that a lower cost overrun or lower investment is required to reduce one tonne of CO₂ per year.

Fig. 19 presents a comparison of the indicator for each study location and each improvement measure. Improvement M2 has the lowest value of the indicator for all three locations, and is therefore the measure that requires the lowest investment cost to achieve a reduction of one tonne of CO₂ per year. In addition, it is also observed that in the most severe climatic zones in winter (D3) the investment cost is lower.

6. Conclusions

In this paper, an analysis of three improvements of the thermal

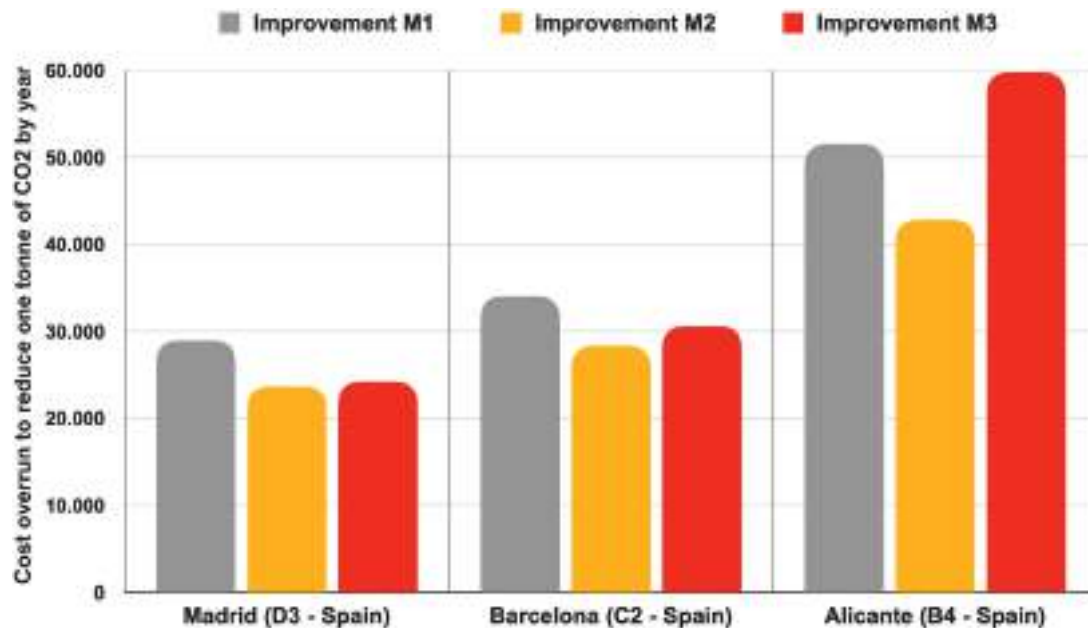


Fig. 19. Comparison between improvements. Cost overrun needed to save one tonne of CO₂ per year.

bridge formed by double-brick façades and intermediate slabs (slab fronts) has been carried out, two of which correspond to novel proposals by the authors (referred to as M2 and M3). In this study the traditional systems of façade construction in Spain has been used.

The M2 improvement consists of placing a 5 mm thick thermal insulation between the stainless steel profile used to support the exterior face brick and the slab front. The M3 improvements consists of replacing the first line of floor slab lightning with expanded polystyrene EPS pieces; replacement of the first and last row of bricks of the inner ceramic sheet with cellular glass blocks; and placement, under the pavement and around its perimeter, of a thermal insulation layer 50 cm wide and 30 mm thick.

The research has been carried out taking into account the indicators of nZEB residential buildings in Spain.

The conclusions of this research are:

- The two proposed new construction improvements, M2 and M3, allow reducing the value of the interior linear thermal transmittance of the thermal bridge between 20% and 63.4%.
- The M2 improvement is the one that provides the greatest reduction in the nZEB indicators:
- Alicante (climate zone B4): 22.6% in heating demand (first indicator); 20.4% in total primary energy consumption (second indicator); 20.7% in non-renewable primary energy consumption (third indicator) and 21.1% in CO₂ emissions.
- Barcelona (climate zone C2): 18.5% in heating demand (first indicator); 15.5% in total primary energy consumption (second indicator); 16.0% in non-renewable primary energy consumption (third indicator) and 16.4% in CO₂ emissions.
- Madrid (climate zone D3): 16.1% in heating demand (first indicator); 14.4% in total primary energy consumption (second indicator); 14.6% in non-renewable primary energy consumption (third indicator) and 14.9% in CO₂ emissions.
- Likewise, improvement M2 presents a lower value of the construction cost overrun indicator to achieve a reduction of one ton of CO₂ per year.

It can be concluded that the treatment, in terms of linear thermal transmittance reduction, of slab front thermal bridges has an effect of reducing the heating energy demand, especially when we increase the

height of the buildings, as the length of the thermal bridge increases and, with it, the heat flow at that point. In addition, in the three cities under study, it has been observed that the cooling energy demand remains practically unchanged.

This study thus demonstrates that the analysis and design of building solutions to reduce the linear thermal transmittance of slab front thermal bridges is a strategy that contributes to achieving the requirements of the nZEB building standard in Spain.

CRediT authorship contribution statement

M.J. Romero: Conceptualization, Methodology, Investigation, Formal analysis, Validation, Writing – original draft, Writing – review & editing. **F. Aguilar:** Methodology, Investigation, Writing – review & editing. **P.G. Vicente:** Methodology, Writing – review & editing, Supervision.

Declaration of competing interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

References

- [1] Eurostat, Statistical Books. Energy data, 2020 edition, <https://ec.europa.eu/eurostat/documents/3217494/11099022/KS-HB-20-001-EN-N.pdf/bf891880-1e3e-b4ba-0061-19810ebf2c64?t=1594715608000>.
- [2] Directive 2010/31/UE of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010, on the energy performance of buildings (recast), <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/HTML/?uri=CELEX:32010L0031&from=ES>.
- [3] EN ISO 52000-1, Energy Performance of Buildings. Overarching EPB Assessment. Part 1: General Framework and Procedures, 2017.
- [4] Technical Building Code, Basic Energy Saving Document DB-HE, its supporting documents DA DB-HE/2 and DA DB-HE/3 and the DB-HE Application Guide. <http://www.codigotecnico.org/DocumentosCTE/AhorroEnergia.html>.
- [5] EN ISO 10211, Thermal Bridges in Building Construction. Heat Flows and Surface Temperatures, 2007. Detailed calculations.
- [6] A. Capozzoli, A. Gorrino, V. Corrado, A building thermal bridges sensitivity analysis, Appl. Energy 107 (2013) 229–243, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.02.045>.
- [7] T.G. Theodosiou, A.M. Papadopoulos, The impact of thermal bridges on the energy demand of buildings with double brick wall constructions, Energy Build. 40 (2008) 2083–2089, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2008.06.006>.

- [8] V. Corrado, A. Gorrino, A. Gasparella, F. Cappelletti, Detailed assessment of thermal bridges in highly insulated buildings, in: *Clima 2010, 10th Rehva World Congress "Sustainable Energy Use in Buildings"*, Antalya, 9-12 May, 2010.
- [9] G. Evola, G. Margani, L. Marletta, Energy and cost evaluation of thermal bridge correction in Mediterranean climate, *Energy Build.* 43 (2011) 2385–2393, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.05.028>.
- [10] Hua Ge, Fuad Baba, Effect of dynamic modeling of thermal bridges on the energy performance of residential buildings with high thermal mass for cold climates, *Sustain. Cities Soc.* 34 (2017) 250–263, <https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.06.016>.
- [11] C. Misiopceki, M. Bouquin, A. Gustavsen, B.P. Jelle, Thermal modeling and investigation of the most energy-efficient window position, *Energy Build.* 158 (2018) 1079–1086, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.10.021>.
- [12] K. Kuusk, J. Kurnitski, T. Kalamees, Calculation and compliance procedures of thermal bridges in energy calculations in various European countries, *Energy Procedia* 132 (2017) 27–32, <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.626>.
- [13] M. Citterio, M. Cocco, H. Erhorn-Kluttig, Thermal Bridges in the EPBD Context: Overview on MS Approaches in Regulations, ASIEPI information paper, 2008, https://www.buildup.eu/sites/default/files/P064_EN_ASIEPI_WP4_IP1_p3073.pdf.
- [14] D1.1, Requirements and drivers of EENSULATE module, WP1, <https://ec.europa.eu/research/participants/documents/downloadPublic?documentIds=080166e5ae8b8494&appId=PPGMS>.
- [15] Passive House Institute (PHI), Passive house standard. https://passiv.de/en/02_informations/02_passive-house-requirements/02_passive-house-requirements.htm.
- [16] Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL) THERM software. <https://window.s.lbl.gov/software/therm>.
- [17] US Department of Energy, Energy efficiency and renewable energy office, building technology program, EnergyPlus software. <https://energyplus.net>.
- [18] INE. National Statistical Institute. <https://www.ine.es/>.
- [19] ETICS Forum 2017, The European ETICS market. Do ETICS sufficiently contribute meet political objectives?. European Association for External Thermal Insulation Composite Systems. https://www.ea-etics.eu/files/dokumente-eae/4_ETICS_Forum/ETICS_Forum_2017/06_European_ETICS_Forum_2017_European_ETICS_Market_Pasker_final_2017-10-03.pdf.
- [20] Seong Jin Chang, Wi Seunghwan, Sumin Kim, Thermal bridging analysis of connections in cross-laminated timber buildings based on ISO 10211, *Construct. Build. Mater.* 213 (2019) 709–722, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.009>.
- [21] CEC catalogue of construction elements. Ministry of transport, mobility and Urban Agenda. Spain. <https://www.codigotecnico.org/Programas/CatalogoElementosConstructivos.html>.
- [22] EN ISO 10456, Building Materials and Products - Hygrothermal Properties - Tabulated Design Values and Procedures for Determining Declared and Design Thermal Values, 2007.
- [23] EN ISO 10077-2, Thermal Performance of Windows, Doors and Shutters. Calculation of Thermal Transmittance, 2017. Part 2: Numerical method for frames.
- [24] HALFEN brickwork support. <https://www.halfen.com/en/>.
- [25] Adell J.M., García-Santos A., Vega S., López-Hombrados C., Peña J., Timperman P. y Yáñez E. "Ensayos en dinteles de fábrica de ladrillo atirantada, sobre los nuevos apoyos PI, distanciados 6m entre sí". *Actas de*.
- [26] Code on Structural Concrete (EHE-08), Chapter 6. Materials. Article 36. Infill elements in floor slabs. https://www.mitma.gob.es/recursos/mfom/6_ehe08.pdf.
- [27] Forli System Technical Manual, EPS lightweighting. http://www.forlisa.es/manual_tecnico/Forli_colocacionSistema.pdf.
- [28] EN ISO 14683, Thermal Bridges in Building Construction. Linear Thermal Transmittance. Simplified Methods and Default Values, 2017.
- [29] F. Aguilar, J.P. Solano, P.G. Vicente, Transient modeling of high-inertial thermal bridges in building using the equivalent thermal wall method, *Appl. Therm. Eng.* 67 (2014) 370–377, <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.03.058>.
- [30] Sofia Real, M. Glória Gomes, A. Moret Rodrigues, J. Alexandre Bogas, Contribution of structural lightweight aggregate concrete to the reduction of thermal bridging effect in buildings, *Construct. Build. Mater.* 121 (2016) 460–470, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.06.018>.
- [31] A. Tilmans, D.V. Orshoven, Software and atlases for evaluating thermal bridges, ASIEPI information paper P198, https://www.buildup.eu/sites/default/files/content/P198_Software_and_atlases_for_evaluating_thermal_bridges_0.pdf.
- [32] CO2 emission factors and primary energy conversion factors of different final energy sources consumed in the buildings sector in Spain. https://energia.gob.es/desarrollo/EficienciaEnergetica/RITE/Reconocidos/Reconocidos/Otros%20documentos/Factores_emision_CO2.pdf.
- [33] Fabrizio Ascione, Nicola Bianco, Filippo de' Rossi, Gianluca Turni, Giuseppe Peter Valoni, Different methods for the modelling of thermal bridges into energy simulation programs: comparisons of accuracy for flat heterogeneous roofs in Italian climates, *Appl. Energy* (2012) 405–418, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.01.022>.
- [34] CYPETHERM HE PLUS, CYPE ingenieros. <http://cypetherm-he-plus.cype.es>.
- [35] Construction price generator, CYPE ingenieros. <http://generadorprecios.cype.es>.

