



Escuela
Politécnica
Superior

Modelado y análisis de puentes térmicos en pilares integrados en fachada



Grado en Arquitectura Técnica

Trabajo Fin de Grado

Autor:

María López Pérez

Tutor/es:

Raúl Tomás Mora García

María Francisca Céspedes López

Julio 2023



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

RESUMEN

Las normativas relacionadas con las pérdidas energéticas en la construcción se actualizan periódicamente para incorporar nuevas tecnologías que reduzcan el consumo energético. Estos cambios normativos se derivan de la necesidad de cumplir con los objetivos del Protocolo de Kyoto y de las directivas europeas. Según el Informe de Estado Global de Edificios y Construcción de 2022, el sector de la construcción representa el 40% de la demanda de energía en Europa y es responsable del 37% de las emisiones de CO₂ relacionadas con la energía.

El Código Técnico de la Edificación (CTE) es una normativa española que establece los requisitos mínimos que deben cumplir las construcciones en diferentes aspectos, como el ahorro de energía (DB-HE). Las modificaciones del DB-HE introducidas en 2019 y las correcciones realizadas en 2022 buscan limitar el consumo energético de los edificios y fomentar el uso de energías renovables. Lo que resulta incompatible con la existencia de puentes térmicos, ya que aumentan la demanda energética del edificio.

Los objetivos principales que tiene este trabajo son analizar el comportamiento del puente térmico en pilares integrados en fachada y comparar los valores de transmitancia térmica lineal obtenidos mediante procedimientos detallados con los estimados por procedimientos simplificados que proporciona el CTE en el DA-DB-HE-3.

En el presente proyecto se aplica el método detallado con modelo bidimensional. Para aplicarlo se utilizan métodos numéricos y el software específico de modelado bidimensional THERM. Se han modelado en THERM 1100 detalles constructivos y se ha generado una base de datos con una muestra final de 1100 observaciones.

Entre los resultados obtenidos, el más relevante es que la forma simplificada para el cálculo de puentes térmicos que aplica el DA DB-HE 3 proporciona unos valores que no son realistas. Otro resultado importante obtenido en el trabajo es la existencia de soluciones constructivas de fachada caravista con un comportamiento térmico mejor que una fachada SATE para el puente térmico de pilares integrados en fachada.

Palabras clave: Puentes térmicos, pilares integrados en fachada, Therm, transmitancia térmica lineal, pérdidas energéticas, DA DB-HE 3, fachada SATE, fachada caravista.

ABSTRACT

Regulations related to energy losses in construction are periodically updated to incorporate new technologies that reduce energy consumption. These regulatory changes stem from the need to comply with the objectives of the Kyoto Protocol and European directives. According to the 2022 Global Status Report for Buildings and Construction, the construction sector accounts for 40% of energy demand in Europe and is responsible for 37% of energy-related CO₂ emissions.

The Technical Building Code (CTE) is a Spanish regulation that establishes the minimum requirements that constructions must meet in various aspects, such as energy efficiency (DB-HE). The modifications to the DB-HE introduced in 2019 and the corrections made in 2022 aim to limit the energy consumption of buildings and promote the use of renewable energy. This is incompatible with the existence of thermal bridges, as they increase the building's energy demand.

The main objectives of this work are to analyze the behavior of the thermal bridge in the pillars integrated in the facade and to compare the values of linear thermal transmittance obtained through detailed procedures with those estimated through simplified procedures provided by the Technical Building Code in the DA-DB-HE-3.

In this project, the detailed method with a two-dimensional model is applied. Numerical methods and the specific two-dimensional modeling software THERM are used to apply this method. A total of 1100 construction details have been modeled in THERM, and a database has been generated with a final sample of 1100 observations.

Among the results obtained, the most relevant one is that the simplified approach for calculating thermal bridges provided by DA-DB-HE-3 gives unrealistic values. Another important result obtained in the work is the existence of facade construction solutions using brickwork that have better thermal performance than an External Thermal Insulation Composite System (ETICS) facade for the thermal bridge of pillars integrated into the facade.

Keywords: Thermal bridges, pillars integrated into the facade, Therm, linear thermal transmittance, energy losses, DA-DB-HE-3, ETICS facade, brickwork facade.

AGRADECIMIENTOS Y DEDICATORIAS

En primer lugar, creo necesario agradecer a Lourdes, mi profesora de dibujo técnico de segundo de bachillerato y arquitecta técnica, porque en mi último año y cuando más perdida estaba sin saber lo que quería estudiar me enseñó lo que la arquitectura técnica y gracias a ella conocí la maravillosa carrera que finalizo con este trabajo. Gracias.

En segundo lugar, agradecer a mi familia, el apoyo incondicional que me han brindado no sólo en la elección de la titulación, también durante todos estos años de estudio.

Quiero agradecer y dedicar tanto mi carrera como este trabajo a Agus, Nacho, Manu y Juan, que habéis hecho de mi paso por la universidad una etapa increíble e inolvidable, me habéis acompañado durante estos cuatro años y sin vosotros la carrera no hubiera sido lo mismo.

Pero en especial se lo quiero agradecer y dedicar a Esther Canet, la mejor amiga y compañera que se puede tener, compartir la carrera contigo ha sido toda una suerte, y es que fue gracias a ti que empecé a ver esta carrera de forma diferente, tu particular visión de la profesión me ha ayudado a disfrutar y aprender todos y cada uno de los días que hemos pasado en nuestro querido mac o en nuestra Poli IV. Además de los momentos que hemos vivido juntas, me has abierto las puertas al mundo laboral y agradezco enormemente la confianza depositada en mí. Tu confianza y tu apoyo incondicional han sido ese empujón que necesitaba en los momentos más complicados. Me has hecho la carrera mucho más fácil y divertida, espero que sigas haciendo lo mismo con todas las oportunidades que nos depare la vida. Espero que este TFG sólo sea un punto y seguido de una etapa muy importante de nuestras vidas.

Por último, agradecer a las personas que confiaron en mi para ofrecerme la oportunidad de solicitar una beca y acabar haciendo este trabajo, pero en especial a mis tutores Raúl y Paqui, por confiar tanto en mí, por guiarme en este camino y por estar siempre ahí para todo lo que he necesitado.

Gracias a todos.

ÍNDICE DE CONTENIDO

Resumen	1
Abstract.....	2
Agradecimientos y dedicatorias	3
Índice de contenido.....	5
Índice de figuras	7
Índice de tablas	12
Índice de abreviaturas, siglas y símbolos	17
1 Introducción	19
1.1 Marco teórico	21
1.2 Objetivos.....	37
1.3 Consideraciones y aspectos formales del documento.....	40
1.4 Limitaciones.....	41
2 Metodología	43
2.1 Población y muestra.....	43
2.2 Procedimiento	47
3 Cálculo de puentes térmicos. Resultados	61
3.1 Fachada de ladrillo caravista.....	61
3.1.1 Influencia cámara de aire	63
3.1.2 Influencia continuidad del aislamiento	68
3.1.3 Influencia relación aislamiento del cerramiento y en el puente térmico para una continuidad exterior del aislamiento.....	70
3.1.4 Influencia forrado del pilar para continuidad exterior del aislamiento ..	72
3.1.5 Influencia posición del pilar para una continuidad interior en el aislamiento.....	75

3.1.6	Influencia relación aislamiento del cerramiento y en el puente térmico para una continuidad interior del aislamiento	77
3.1.7	Influencia posición del pilar para una discontinuidad en el aislamiento	81
3.1.8	Influencia forrado del pilar para una discontinuidad en el aislamiento .	85
3.2	Fachada SATE	88
4	Discusión	93
4.1	Comparativa valores CTE	93
4.2	Fachada de ladrillo caravista	100
4.3	Fachada SATE	107
4.4	Comparativa fachada SATE y fachada caravista	109
5	Conclusiones	115
5.1	Líneas futuras de investigación	118
6	Bibliografía	119
	Anexo 1. Lista de casos analizados.	125
	Anexo 2. Justificación grupos puentes térmicos.	131

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Fuga de calor a través de un puente térmico por: a) variación en la uniformidad de la construcción por cambio de material; b) diferencia del área externa e interna; y c) penetración completa de elementos constructivos con diferente conductividad. Fuente: elaboración propia.....	26
Figura 2. Ejemplos de puente térmico de pilares integrados en fachada. Fuente: elaboración propia.	33
Figura 3. Tipología de fachadas consideradas del Grupo 1. Fuente: anexos DB-HE (Ministerio de la Presidencia, Relaciones con las Cortes y Memoria Democrática, 2022).....	34
Figura 4. Tipología de fachadas consideradas del Grupo 2. Fuente: anexos DB-HE (Ministerio de la Presidencia, Relaciones con las Cortes y Memoria Democrática, 2022).....	34
Figura 5. Tabla proporcionada por el atlas de puentes térmicos con los valores de transmitancia térmica lineal para el Grupo 1. Fuente: anexos DB-HE (Ministerio de la Presidencia, Relaciones con las Cortes y Memoria Democrática, 2022).....	35
Figura 6. Tabla proporcionada por el atlas de puentes térmicos con los valores de transmitancia térmica lineal para el Grupo 2. Fuente: anexos DB-HE (Ministerio de la Presidencia, Relaciones con las Cortes y Memoria Democrática, 2022).....	35
Figura 7. Tabla proporcionada por la norma UNE-EN ISO 14683 de valores de transmitancia térmica lineal para pilares integrados en fachada. Fuente: norma UNE-EN ISO 14683. (AENOR, 2020).....	36
Figura 8. Solución constructiva pilar exterior, con cámara de aire y con forrado del pilar (a) y solución constructiva con forrado accidental (b). Fuente: elaboración propia.	45

Figura 9. Solución constructiva pilar exterior, sin cámara de aire y con forrado del pilar (a) y solución constructiva con forrado accidental (b). Fuente: elaboración propia.....	45
Figura 10. Solución constructiva pilar embebido, sin cámara de aire y con forrado del pilar (a) y solución constructiva con forrado accidental (b). Fuente: elaboración propia.....	46
Figura 11. Solución constructiva pilar embebido, con cámara de aire y con forrado del pilar (a) y solución constructiva con forrado accidental (b). Fuente: elaboración propia.....	46
Figura 12. Composición fachada código F 1.1. Fuente: elaboración propia.....	48
Figura 13. Composición fachada código F 1.2. Fuente: elaboración propia.....	48
Figura 14. Composición fachada código F 4.1. Fuente: elaboración propia.....	49
Figura 15. Representación de flujos unidimensionales y bidimensionales, y la relación entre ψ_e y ψ_i según se tomen dimensiones exteriores o interiores. Fuente: Figura 4. Significado de ψ según la superposición. Del DA-DB-HE-3.....	52
Figura 16. Definición de las longitudes interiores (L_{int}) y las longitudes exteriores (L_{ext}) para la obtención del valor de A_i . Fuente: elaboración propia.....	53
Figura 17. Detalle constructivo fachada caravista. Fuente: elaboración propia.....	55
Figura 18. Cálculo de la transmitancia con el programa THERM para hacer la comprobación de que los materiales se han introducido correctamente en el programa. Fuente: elaboración propia a partir de la simulación realizada en THERM.....	56
Figura 19. Dibujo de la forma simplificada de un detalle constructivo en AutoCAD para introducirlo posteriormente en el programa THERM. Fuente: elaboración propia.....	57
Figura 20. Separación de los planos de corte (d_{min}). Fuente: elaboración propia.....	57
Figura 21. Detalle constructivo introducido en el programa THERM con la asignación de materiales ya realizada. Fuente: elaboración propia.....	58
Figura 22. Valor de la resistencia superficial. Fuente: Punto 3.4 del DA-DB-HE-3.....	58

Figura 23. Captura del programa THERM para ver las características que hay que asignar a las condiciones de contorno. Fuente: elaboración propia.....	59
Figura 24. Detalle constructivo introducido en el programa THERM con la asignación de las condiciones de contorno ya hecha. Fuente: elaboración propia.	59
Figura 25. Ejemplo de resultados visuales que proporciona el programa THERM: Infrarrojos. Fuente: elaboración propia.	60
Figura 26. Ejemplo de resultados visuales que proporciona el programa THERM: Isotermas. Fuente: elaboración propia.	60
Figura 27. Resultados numéricos relevantes obtenidos del programa THERM. Fuente: elaboración propia.	60
Figura 28. Esquema de las diferentes soluciones constructivas analizadas en función de unas variables determinadas. Fuente: elaboración propia.....	62
Figura 29. Detalles.....	63
Figura 30. Comportamiento del puente térmico considerando la continuidad del aislamiento térmico, según las características constructivas explicadas en la Tabla 11. Fuente: elaboración propia.	64
Figura 31. Detalles.....	65
Figura 32. Comportamiento del puente térmico considerando la discontinuidad del aislamiento térmico, según las características constructivas explicadas en la Tabla 12. Fuente: elaboración propia.	66
Figura 33. Gráfico Figura 32b a una escala diferente. Fuente: elaboración propia.....	66
Figura 34. Detalles.....	68
Figura 35. Comportamiento del puente térmico considerando la continuidad del aislamiento térmico, según las características constructivas explicadas en la Tabla 13. Fuente: elaboración propia.	69
Figura 36. Detalles.....	70
Figura 37. Comportamiento del puente térmico considerando la relación del aislamiento térmico, según las características constructivas explicadas en la Tabla 14. Fuente: elaboración propia.	71

Figura 38. Detalles	72
Figura 39. Comportamiento del puente térmico considerando la relación del aislamiento térmico, según las características constructivas explicadas en la Tabla 15. Fuente: elaboración propia.	73
Figura 40. Dimensión del puente térmico según la solución constructiva. Fuente: elaboración propia.	73
Figura 41. Detalles	75
Figura 42. Comportamiento del puente térmico considerando la continuidad del aislamiento térmico, según las características constructivas explicadas en la Tabla 16 . Fuente: elaboración propia.	76
Figura 43. Detalles	78
Figura 44. Comportamiento del puente térmico considerando la relación entre el aislamiento en el cerramiento y el pilar, según las características constructivas explicadas en la Tabla 17. Fuente: elaboración propia.....	79
Figura 45. Detalles	81
Figura 46. Comportamiento del puente térmico considerando la discontinuidad del aislamiento, según las características constructivas explicadas en la Tabla 19. Fuente: elaboración propia.	82
Figura 47. Disposición de la composición del cerramiento en función de los espesores del aislante térmico. Casos: a) 6 cm; b) 12 cm y c) 14 cm. Fuente: elaboración propia.	83
Figura 48. Gráfico Figura 46b a una escala diferente. Fuente: elaboración propia.	84
Figura 49. Detalles	85
Figura 50. Comportamiento del puente térmico considerando la discontinuidad del aislamiento, según las características constructivas explicadas en la Tabla 20. Fuente: elaboración propia.	86
Figura 51. Longitud del puente térmico en función de los espesores del aislamiento térmico. Casos: a) 6 cm; b) 12 cm. Fuente: elaboración propia.	87
Figura 52. Detalles	88

Figura 53. Comportamiento del puente térmico fachada SATE. Fuente: elaboración propia.	90
Figura 54. Influencia del forrado en las distancias a los planos de corte y como consecuencia en el valor de la transmitancia térmica lineal. Fuente: elaboración propia.	100
Figura 55. Gráfico que muestra el porcentaje de mejora del comportamiento térmico de las diferentes soluciones constructivas en función de la relación del aislamiento. Fuente: elaboración propia.	101
Figura 56. Reducción de la superficie interior útil. Fuente: elaboración propia.	103
Figura 57. Gráficos del comportamiento térmico según la posición del aislamiento térmico. Fuente: elaboración propia.	104
Figura 58. Comparativa de la dimensión del puente térmico en función de la posición del pilar. Fuente: elaboración propia.	105
Figura 59. Detalle constructivo 1 con mejores resultados de fachada caravista. Fuente: elaboración propia.	110
Figura 60. Detalle constructivo 2 con mejores resultados de fachada caravista. Fuente: elaboración propia.	110

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Modificaciones del DB-HE como consecuencia de la transposición de las Directivas europeas. Fuente: elaboración propia a partir de los Reales Decretos mencionados.	23
Tabla 2. Resumen sobre los diferentes métodos de cálculo de puentes térmicos que contempla el DA-DB-HE-3. Fuente: elaboración propia a partir de información extraída del DA-DB-HE-3.	30
Tabla 3. Cálculo numérico para valorar el volumen de trabajo que supondría el estudio. Fuente: elaboración propia.	43
Tabla 4. Composición de fachada correspondiente a la tipología F1.1-1.2 del Catálogo de Elementos Constructivos. Fuente: elaboración propia.	47
Tabla 5. Composición de fachada correspondiente a la tipología F4.1 del Catálogo de Elementos Constructivos. Fuente: elaboración propia.	48
Tabla 6. Variables para analizar el comportamiento del puente térmico. Fuente: elaboración propia.	50
Tabla 7. Resistencia térmica superficial de cerramientos en contacto con el aire exterior en función de la posición de cerramiento y el sentido del flujo. Fuente: elaboración propia a partir de la Tabla 1 del DA-DB-HE-1.	54
Tabla 8. Resistencia térmica de cámaras de aire no ventiladas $[(m^2 \cdot K)/W]$ Fuente: elaboración propia a partir de la Tabla 2 del DA-DB-HE-1.	55
Tabla 9. Resistencia térmica de cámaras de aire no ventiladas $[(m^2 \cdot K)/W]$ con valores extra obtenidos por interpolación. Fuente: elaboración propia a partir de la Tabla 2 del DA-DB-HE-1.	55
Tabla 10. Ejemplo de cálculo resistencia térmica de las diferentes capas de una fachada caravista. Fuente: elaboración propia.	55
Tabla 11. Características de las soluciones constructivas comparadas según existencia de cámara de aire considerando la continuidad del aislamiento térmico. Fuente: elaboración propia.	63

Tabla 12. Características de las soluciones constructivas comparadas según la existencia de la cámara de aire considerando la discontinuidad del aislamiento térmico. Fuente: elaboración propia.	65
Tabla 13. Características de las soluciones constructivas comparadas según continuidad del aislamiento. Fuente: elaboración propia.	68
Tabla 14. Características de las soluciones constructivas comparadas según relación en el aislamiento para una solución constructiva con aislamiento exterior. Fuente: elaboración propia.	70
Tabla 15. Características de las soluciones constructivas comparadas según forrado del pilar considerando la continuidad del aislamiento. Fuente: elaboración propia.....	72
Tabla 16. Características de las soluciones constructivas comparadas según posición del pilar considerando la continuidad interior del aislamiento. Fuente: elaboración propia.	75
Tabla 17. Características de las soluciones constructivas comparadas según la existencia de la cámara de aire considerando la discontinuidad del aislamiento térmico. Fuente: elaboración propia.	78
Tabla 18. Valor de la transmitancia térmica lineal obtenida en función de la relación entre el aislamiento en el cerramiento y el aislamiento en el pilar. Fuente: elaboración propia.	80
Tabla 19. Características de las soluciones constructivas comparadas según la posición del pilar considerando la discontinuidad del aislamiento Fuente: elaboración propia.	81
Tabla 20. Características de las soluciones constructivas comparadas según forrado del pilar considerando la discontinuidad del aislamiento. Fuente: elaboración propia.	85
Tabla 21. Características de las soluciones constructivas de fachada SATE. Fuente: elaboración propia.	88
Tabla 22. Comparativa valores de transmitancia térmica lineal del Grupo 1 obtenidos por métodos simplificados por el DA-DB-HE-3 y los obtenidos por métodos	

detallados. Fuente: elaboración propia a partir de los valores proporcionados por DA-DB-HE-3.	94
Tabla 23. Comparativa valores de transmitancia térmica lineal Grupo 2 obtenidos por métodos simplificados por el DA-DB-HE-3 y los obtenidos por métodos detallados. Fuente: elaboración propia a partir de los valores proporcionados por DA-DB-HE-3.	95
Tabla 24. Comparativa valores de transmitancia térmica lineal de SATE, Grupo 1, obtenidos por métodos simplificados por el DA-DB-HE-3 y los obtenidos por métodos detallados. Fuente: elaboración propia a partir de los valores proporcionados por DA-DB-HE-3.	97
Tabla 25. Cuadro resumen de la clasificación planteada para los puentes térmicos de pilares integrados en fachada. Fuente: elaboración propia.	98
Tabla 26. Resumen hipótesis comparativa valores CTE. Fuente: elaboración propia.	99
Tabla 27. Características constructivas que se utilizan para evaluar la mejora del comportamiento térmico. Fuente: elaboración propia.	102
Tabla 28. Mejora transmitancia térmica lineal en función del espesor del aislamiento en el encuentro con el pilar. Fuente: elaboración propia.	102
Tabla 29. Resumen hipótesis fachada caravista. Fuente: elaboración propia.	106
Tabla 30. Resumen hipótesis fachada SATE. Fuente: elaboración propia.	108
Tabla 31. Características de las soluciones constructivas de fachada caravista con mejores resultados térmicos que la tipología de fachada SATE. Fuente: elaboración propia.	110
Tabla 32. Resultados de transmitancia obtenidos para las soluciones de LCV con menores pérdidas energéticas y la solución SATE con mejor comportamiento térmico. Fuente: elaboración propia.	111
Tabla 33. Resumen de las hipótesis para la comparativa de fachada SATE y fachada caravista. Fuente: elaboración propia.	114
Tabla 34. Características constructivas de los diferentes casos de fachada caravista con los que se ha trabajado. Fuente: elaboración propia.	125

Tabla 35. Características constructivas de los diferentes casos de fachada SATE con los que se ha trabajado. Fuente: elaboración propia.	130
Tabla 36. Valores de transmitancia térmica lineal obtenidos de tipología caravista para espesores de 6 cm y conductividad de 0,029 [W/(m·K)] en el aislante térmico. Fuente: elaboración propia	131
Tabla 37. Valores de transmitancia térmica lineal obtenidos de tipología SATE para espesores de 6 cm y conductividad de 0,029 [W/(m·K)] en el aislante térmico. Fuente: elaboración propia.	132
Tabla 38. Grupo A con continuidad del aislamiento por el exterior. Fuente: elaboración propia.	132
Tabla 39. Grupo B con continuidad del aislamiento por el interior. Fuente: elaboración propia.	133
Tabla 40. Grupo D con discontinuidad del aislamiento. Fuente: elaboración propia.	133
Tabla 41. Grupo A1 con continuidad del aislamiento por el exterior con relación 1 del aislamiento. Fuente: elaboración propia.	134
Tabla 42. Grupo A2 con continuidad del aislamiento por el exterior con relación 0,5 del aislamiento. Fuente: elaboración propia.	134
Tabla 43. Grupo B1 con continuidad del aislamiento por el exterior con relación 1 y superiores del aislamiento. Fuente: elaboración propia.	135
Tabla 44. Grupo B2 con continuidad del aislamiento por el exterior con relación 0,5 del aislamiento. Fuente: elaboración propia.	135
Tabla 45. Grupo C1 tipología SATE sin forrado del pilar. Fuente: elaboración propia. ..	136
Tabla 46. Grupo C2 tipología fachada SATE y con forrado del pilar. Fuente: elaboración propia.	136
Tabla 47. Grupo D1 con discontinuidad del aislamiento y sin forrado. Fuente: elaboración propia.	137
Tabla 48. Grupo D2 con discontinuidad del aislamiento y con forrado. Fuente: elaboración propia.	137

- Tabla 49. Valores transmitancia térmica lineal de las diferentes conductividades térmicas para la comprobación de la clasificación realizada. Fuente: elaboración propia. 138
- Tabla 50. Valores transmitancia térmica lineal de los diferentes espesores para la comprobación de la clasificación realizada. Fuente: elaboración propia. 138

ÍNDICE DE ABREVIATURAS, SIGLAS Y SÍMBOLOS

Siglas	Definición
ACS	Agua Caliente Sanitaria
CEC	Catálogo de Elementos Constructivos
COP	Conferencia de las partes
CTE	Código Técnico de la Edificación
DA-DB-HE-3	Documento de Apoyo al Documento Básico DB-HE Ahorro de energía
DB-HE	Documento Básico Ahorro de Energía
DB-HE 1	Documento Básico Ahorro de Energía. Condiciones para el control de la demanda energética
DB-HR	Documento Básico Protección frente al Ruido
DB-HS	Documento Básico Salubridad
DB-SE	Documento Básico Seguridad Estructural
DB-SI	Documento Básico Seguridad en caso de Incendio
DB-SUA	Documento Básico Seguridad de Utilización y Accesibilidad
EECN	Edificio de Energía Casi Nulo
GEI	Gases de Efecto Invernadero
HULC	Herramienta unificada LIDER-CALENER
IPCC	Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático
LOE	Ley de Ordenación de la Edificación
PYL	Placa de Yeso Laminado
SATE	Sistema de Aislamiento Térmico por el Exterior
TFG	Trabajo Fin de Grado

Símbolo	Definición	Unidad
Ψ	Transmitancia térmica lineal	W/(m·K)
Ψ_e	Transmitancia térmica lineal medida en sistema de dimensiones exteriores	W/(m·K)
Ψ_i	Transmitancia térmica lineal medida en sistema de dimensiones interiores	W/(m·K)
ϑ_i	Temperatura interior de diseño	K
ϑ_e	Temperatura exterior de diseño	K
ϕ_{2D}	Flujo de calor a través del elemento analizado mediante un modelo bidimensional	W
A_i	Superficie a la que se aplica el valor U_i	m ²
U_i	Transmitancia térmica del elemento adyacente	W/(m ² ·K)
L	Longitud del encuentro	m
R	Resistencia térmica	(m ² ·K)/W
R _t	Resistencia térmica total del componente constructivo	(m ² ·K)/W
R _{se}	Resistencias térmicas superficial exterior	(m ² ·K)/W
R _{si}	Resistencias térmicas superficial interior	(m ² ·K)/W
λ	Conductividad térmica	W/(m·K)
e	Espesor	m

1 INTRODUCCIÓN

La autora del presente Trabajo Final de Grado (en adelante TFG) fue seleccionada para una beca de colaboración con el área de Construcciones Arquitectónicas del Departamento de Edificación y Urbanismo para el curso 2022-2023.

La beca de colaboración tenía como temática el análisis energético de los edificios y de sus soluciones constructivas. El objetivo principal de esta convocatoria fue la de crear parte de una base de datos del puente térmico que se produce en los pilares integrados en fachada. Como objetivo secundario era que el beneficiario de la beca pudiera realizar el TFG asociado a la beca de colaboración mencionado, de forma que se fomente la investigación y el conocimiento científico.

Por otro lado, las normativas relativas a las pérdidas energéticas en edificación se cambian de forma periódica para incorporar nuevas tecnologías que permitan reducir el consumo energético. Los Reales Decretos que regulan en España este tema nacen de la necesidad de trasposición de las diferentes directivas europeas, las cuales nacen para poder cumplir con los objetivos del Protocolo de Kyoto.

En 1995 el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (en adelante IPCC por sus siglas en inglés Intergovernmental Panel on Climate Change) publicó su Segundo Informe de Evaluación (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, 1995), el cual concluía que a causa de las emisiones de gases de efecto invernadero el clima había empezado a cambiar. Es a raíz de este informe que los países se dieron cuenta de que los compromisos establecidos en el marco de la Convención (Naciones Unidas, 1992) no serían suficientes, iniciándose así nuevas conversaciones para adoptar unos compromisos más concretos y estrictos para países industrializados. En la tercera conferencia de las partes (COP3) se adoptó el Protocolo de Kyoto (Naciones Unidas, 1998), instrumento que contó con medidas energéticas de lucha contra el cambio climático.

Este protocolo estableció objetivos de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero para los países industrializados con el fin de combatir el cambio climático. El objetivo principal de Protocolo de Kyoto era reducir las emisiones de gases de efecto invernadero a niveles inferiores a los de 1990 durante el período de 2008 a 2012. Los países

que lo firmaron y ratificaron establecieron compromisos de reducción de emisiones, y se establecieron penalizaciones para aquellos países que no cumplieran con sus objetivos.

Entre los países que firmaron se encuentra España (Jefatura del Estado, 2005a), quien ratificó el acuerdo en 2002 y se comprometió a reducir sus emisiones de gases de efecto invernadero en un 15% con respecto a los niveles de 1990/1995 para el período 2008-2012 (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, s.f.), no fue hasta el 2005 cuando este protocolo entró en vigor por culpa de los países más desarrollados (Jefatura del Estado, 2005a).

Para cumplir con sus compromisos en el marco del Protocolo de Kyoto, España traspuso diversas normativas a nivel nacional que establecían objetivos de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero como la “Ley 1/2005, de 9 de marzo, por la que se regula el régimen del comercio de derechos de emisión de gases de efecto invernadero.” (Jefatura del Estado, 2005b) o el “Real Decreto 1370/2006, de 24 de noviembre, por el que se aprueba el Plan Nacional de Asignación de derechos de emisión de gases de efecto invernadero, 2008-2012.” (Ministerio de la Presidencia, 2006).

Según el Informe de Estado global de Edificios y Construcción de 2022 (United Nations Environment Programme, 2022), el sector de la construcción supone el 40% de la demanda de energía de Europa, y representa entorno al 37% de las emisiones de CO₂ relacionadas con la energía., además de suponer la demanda de los edificios más de un 34% de la demanda energética a nivel mundial.

Estos datos hacen que la construcción sea un sector de acción inmediata, por lo que se pretende con diversas normativas a nivel global y europeo la disminución de la huella de carbono en los materiales de construcción, multiplicar los compromisos políticos junto con la acción y aumentar la inversión en eficiencia energética. (ecoavant, 2022).

En el sector de la construcción en España, ante la necesidad de unificar las normativas relativas a edificación, se aprobó el Código Técnico de la Edificación mediante el “Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo, por el que se aprueba el Código Técnico de la Edificación”, unificando en este documento todas las normativas españolas relacionadas con la edificación.

1.1 MARCO TEÓRICO

Ante la necesidad de unificar las normativas españolas en el sector de la construcción y para cumplir con los compromisos de España en el marco del Protocolo de Kyoto, el Ministerio de Vivienda (2006) redactó el Código Técnico de la Edificación (CTE) normativa que estableció los requisitos mínimos que deben cumplir las edificaciones que se recogen en diferentes documentos básicos (Ministerio de la Presidencia, Relaciones con las Cortes y Memoria Democrática, 2022) como el de seguridad estructural (DB-SE), el de seguridad en caso de incendios (DB-SI), el de seguridad de utilización y accesibilidad (DB-SUA), el de ahorro de energía (DB-HE), el de protección frente al ruido (DB-HR) y el de salubridad (DB-HS). Todos los documentos básicos se van actualizando para adaptarse a las necesidades y exigencias demandadas por la sociedad. En este TFG al estudiar las pérdidas energéticas en los pilares integrados en fachada se va a poner especial atención en el DB-HE y en sus documentos de apoyo (DA) por ser la normativa que regula el consumo y las pérdidas energéticas de los edificios.

El “Real Decreto 235/2013, de 5 de abril, por el que se aprueba el procedimiento básico para la certificación de la eficiencia energética de los edificios” (Ministerio de la Presidencia, 2013), trasposición de la “Directiva 2010/31/UE” (El Parlamento Europeo y el Consejo de la Unión Europea, 2010) estableció que como máximo cada 5 años se revisará el Documento Básico Ahorro de Energía (DB-HE).

El DB-HE se ha modificado en varias ocasiones para cumplir con las exigencias fijadas por las diferentes directivas europeas de eficiencia energética, la primera modificación tuvo lugar en 2007 ante la necesidad de trasponer la “Directiva 2002/91/CE de 16 de diciembre de 2002 relativa a la eficiencia energética de los edificios” (El Parlamento Europeo y el Consejo de la Unión Europea, 2002) se aprobaron el “Real Decreto 1027/2007, de 20 de julio, por el que se aprueba el Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios” (Ministerio de la Presidencia, 2007a). y el “Real Decreto 47/2007, de 19 de enero, por el que se aprueba el Procedimiento básico para la certificación de eficiencia energética de edificios de nueva construcción” (Ministerio de la Presidencia, 2007b).

La “Directiva 2002/91/CE” (El Parlamento Europeo y el Consejo de la Unión Europea, 2002), se modificó por la “Directiva 2010/31/UE” (El Parlamento Europeo y el Consejo de la Unión Europea, 2010) circunstancia que hizo necesario trasponer de nuevo esta nueva

directiva al ordenamiento jurídico español y que tuvo como consecuencia la modificación del “Real Decreto 47/2007, de 19 de enero, por el que se aprueba el Procedimiento básico para la certificación de eficiencia energética de edificios de nueva construcción” (Ministerio de la Presidencia, 2007b) a través del “Real Decreto 235/2013, de 5 de abril, por el que se aprueba el procedimiento básico para la certificación de la eficiencia energética de los edificios” (Ministerio de la Presidencia, 2013).

Este último documento fue modificado posteriormente debido a la “Directiva 2012/27/UE” (El Parlamento Europeo y el Consejo de la Unión Europea, 2012) por el “Real Decreto 564/2017, de 2 de junio, por el que se modifica el Real Decreto 235/2013, de 5 de abril, por el que se aprueba el procedimiento básico para la certificación de la eficiencia energética de los edificios” (Ministerio de la Presidencia y para las Administraciones Territoriales, 2017). Ante la necesidad de impulsar y promocionar un conjunto de actuaciones que puedan contribuir al ahorro y la eficiencia de la energía primaria consumida, entre otras medidas, el “Real Decreto 56/2016, de 12 de febrero, por el que se transpone la Directiva 2012/27/UE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 25 de octubre de 2012, relativa a la eficiencia energética, en lo referente a auditorías energéticas, acreditación de proveedores de servicios y auditores energéticos y promoción de la eficiencia del suministro de energía” traspone parcialmente la “Directiva 2012/27/UE” (El Parlamento Europeo y el Consejo de la Unión Europea, 2012).

La siguiente Directiva que se implementó fue la “Directiva 2018/844/UE” (El Parlamento Europeo y el Consejo de la Unión Europea, 2018) la cual modificó las dos Directivas anteriores mencionadas y fue el motivo de otra modificación del CTE, aprobada mediante el “Real Decreto 732/2019, de 20 de diciembre, por el que se modifica el Código Técnico de la Edificación, aprobado por el Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo.” (Ministerio de Fomento, 2019).

Es también por esta directiva que se aprobó el “Real Decreto 390/2021, de 1 de junio, por el que se aprueba el procedimiento básico para la certificación de la eficiencia energética de los edificios” (Ministerio de la Presidencia, Relaciones con las Cortes y Memoria Democrática, 2021).

La versión actual del CTE es la que se modifica con el “Real Decreto 450/2022, de 14 de junio, por el que se modifica el Código Técnico de la Edificación, aprobado por el Real

Decreto 314/2006, de 17 de marzo” (Ministerio de la Presidencia, Relaciones con las Cortes y Memoria Democrática, 2022).

La modificación de 2022 del CTE sólo contempla correcciones de errores, modificaciones puntuales y no sustanciales relativas a eficiencia energética, es la modificación que se realizó en 2019 a través del “Real Decreto 732/2019” (Ministerio de Fomento, 2019) donde se introducen modificaciones sustanciales en el Documento Básico de ahorro de energía (DB-HE).

En la Tabla 1 se recogen las diferentes modificaciones que se han ido introduciendo con los diferentes Reales Decretos mencionados.

Tabla 1. Modificaciones del DB-HE como consecuencia de la transposición de las Directivas europeas. Fuente: elaboración propia a partir de los Reales Decretos mencionados.

Directiva Europea	Real Decreto	Modificaciones
Directiva 2002/91/CE	Real Decreto 1027/2007	Se aprueba el Reglamento de instalaciones térmicas en los edificios (RITE) como medida de desarrollo del Plan de acción de la estrategia de ahorro y eficiencia energética en España (2005-2007) y como contribución para alcanzar los objetivos establecidos por el Plan de fomento de las energías renovables (2000-2010), fomentando una mayor utilización de la energía solar térmica sobre todo en la producción de ACS.
	Real Decreto 47/2007	Se establece el Procedimiento básico que debe cumplir la metodología de cálculo de la calificación de eficiencia energética, con el que se inicia el proceso de certificación, considerando aquellos factores que más incidencia tienen en el consumo de energía de los edificios de nueva construcción o que se modifiquen, reformen o rehabiliten en una extensión determinada.
Directiva 2010/31/UE	Real Decreto 235/2013	Incorporación del Procedimiento básico para la certificación de eficiencia energética de edificios existentes. Establece la obligación de poner a disposición de los compradores o usuarios de los edificios un certificado de eficiencia energética que deberá incluir información objetiva sobre la eficiencia energética de un edificio y valores de referencia tales como requisitos mínimos de eficiencia energética con el fin de que los propietarios o arrendatarios del edificio o de una unidad de éste puedan comparar y evaluar su eficiencia energética.

Directiva Europea	Real Decreto	Modificaciones
Directiva 2012/27/UE	Real Decreto 56/2016	Trasposición parcialmente la directiva, principalmente en lo relativo a auditorías energéticas, sistemas de acreditación para proveedores de servicios y auditores energéticos y la promoción de la eficiencia energética en los procesos de producción y uso del calor y del frío.
	Real Decreto 564/2017	Desde 2019 los edificios nuevos de titularidad pública serán edificios de consumo de energía casi nulo. Desde 2021 todos los edificios nuevos serán edificios de energía casi nulo (EECN).
Directiva 2018/844/UE	Real Decreto 732/2019	Se introduce una nueva exigencia básica de salubridad HS 6, de protección frente al gas radón. Se realizan modificaciones en el DB SI de «Seguridad en caso de incendio», para limitar el riesgo de propagación del incendio por el exterior del edificio.
	Real Decreto 390/2021	Modificación y transposición de todos los Reales Decretos y Directivas anteriores, recopilando en este Real Decreto todas las modificaciones adoptadas.

Como ya se ha mencionado, la modificación realizada por el “Real Decreto 450/2022”, no aporta cambios importantes, por lo que se va a prestar especial atención en la modificación anterior a esta, que es donde se producen modificaciones sustanciales en el DB-HE, entre esas modificaciones se encuentran las siguientes:

- Se actualiza la definición del Edificio de Consumo de Energía Casi Nulo (EECN), concepto que se recoge en la “Directiva 2010/31/UE” citada antes, además de actualizar los valores relativos a las exigencias para que un edificio sea considerado EECN, además, introduce la limitación del Consumo de Energía Primaria Total en función de la zona climática y del uso del edificio.
- Se establece un valor límite para el consumo de energía primaria no renovable en función del uso del edificio, la zona climática y si es obra nueva o reforma para los espacios que se encuentren dentro de la envolvente térmica, con la intención de potenciar las energías renovables, mientras que en la versión anterior este límite se obtenía en función de la zona climática y la superficie de espacios habitables del edificio.

- Se aumenta el porcentaje de energía cubierto por renovables para Agua Caliente Sanitaria (ACS) y piscinas climatizadas, en la versión anterior a la modificación de 2019 se aportaba una tabla en función de la demanda total de ACS del edificio y de la zona climática, estando los porcentajes entre 30% y 70%, mientras que en la modificación se establece una contribución mínima del 70% para todas las zonas climáticas, porcentaje solo reducible a un 60% en caso de demandas de ACS menores a 5000 l/día. Potenciando a su vez que este aporte mínimo de energía renovable se genere en el propio edificio o sus proximidades.
- Se potencia la generación de energía eléctrica, permitiendo cualquiera de las fuentes renovables disponibles, a diferencia de la versión anterior que únicamente contemplaba la “*obtenida por sistemas de captación y transformación de energía solar por procedimientos fotovoltaicos*” (Ministerio de Fomento, 2017)

Se podría resumir en que el objetivo de las modificaciones del CTE introducidas en 2019 con el “Real Decreto 732/2019” y que se mantiene tras la última modificación de 2022 con el “Real Decreto 450/2022” es limitar el consumo energético de los edificios y fomentar el autoconsumo con la utilización de energías renovables generadas en los edificios, buscando reducir significativamente la dependencia de fuentes de energía no renovables. Además, busca que la energía renovable generada in situ se utilice para el suministro de agua caliente sanitaria y/o climatización de piscinas. Es decir, se busca promover la construcción de EECN que sean altamente eficientes y que utilicen en su gran mayoría las energías renovables mencionadas, buscando así reducir el impacto del edificio sobre el medioambiente.

El DB-HE (Ministerio de Transporte, Movilidad y Agenda Urbana, 2022) se divide en 6 subcapítulos, entre ellos el DB-HE 1, el cual contempla la obligatoriedad de que el diseño y construcción del edificio demande poca energía, obligando a que el edificio disponga de una envolvente de características adecuadas para que pueda cumplirse esta limitación de la demanda y se alcance con ello el bienestar térmico, reduciendo la posibilidad de aparición de condensaciones y tratando adecuadamente los puentes térmicos para limitar las pérdidas y/o ganancias de calor.

Para cumplir las limitaciones de demanda energética del edificio es importante conocer qué es un puente térmico, cómo afectan los puentes térmicos a esta demanda energética y cómo solucionarlos.

El Código Técnico de la Edificación (Ministerio de Vivienda, 2006), en su Documento Básico HE1, define puente térmico como “*zona de la envolvente térmica del edificio en la que se evidencia una variación de la uniformidad de la construcción, ya sea por un cambio del espesor del cerramiento o de los materiales empleados, por la penetración completa o parcial de elementos constructivos con diferente conductividad, por la diferencia entre el área externa e interna del elemento, etc., que conllevan una minoración de la resistencia térmica respecto al resto del cerramiento.*”

Mientras que la norma UNE-EN ISO 10211 (AENOR, 2012) define puente térmico como “*parte del cerramiento de un edificio en la que la resistencia térmica normalmente uniforme cambia significativamente debido a penetraciones completas o parciales en el cerramiento de un edificio, de materiales con diferente conductividad térmica, y/o cambios en el espesor de la fábrica, y/o una diferencia entre áreas internas o externas, como ocurre en las uniones entre muros, suelos o techos.*”

La Figura 1 representa las diferentes situaciones en las que se producen puentes térmicos en un edificio conforme a las definiciones anteriores.

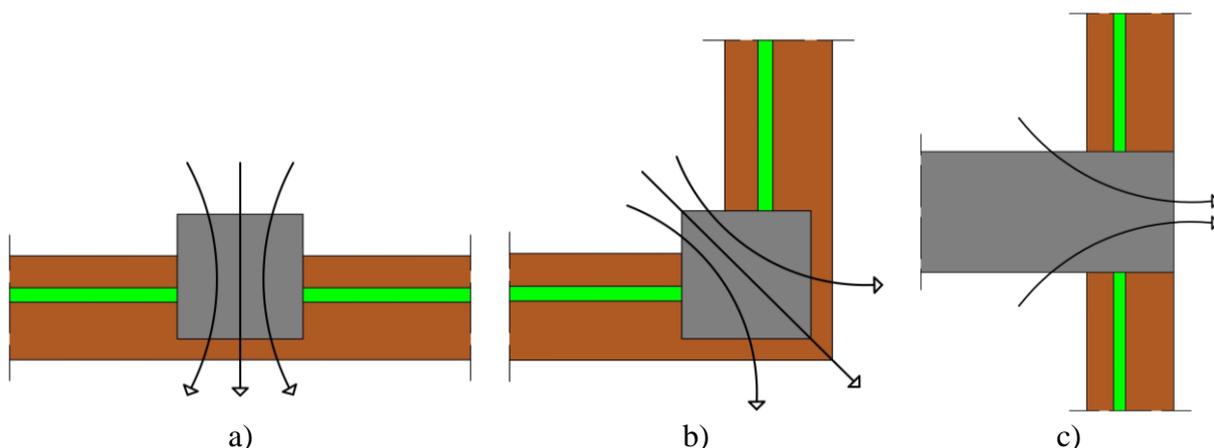


Figura 1. Fuga de calor a través de un puente térmico por: a) variación en la uniformidad de la construcción por cambio de material; b) diferencia del área externa e interna; y c) penetración completa de elementos constructivos con diferente conductividad. Fuente: elaboración propia.

La exigencia básica del DB-HE 1 es limitar la demanda energética para alcanzar el bienestar térmico interior de los ocupantes. El CTE pretende reducir el consumo de energía de los edificios limitando los puentes térmicos, ya que éstos provocan un aumento de la demanda energética, disminuyendo la eficiencia energética del edificio y haciendo más complicado y costoso alcanzar la condición de confort en el interior de la vivienda. Por este motivo, existe una incompatibilidad entre los puentes térmicos y el CTE, por lo que los puentes térmicos son zonas importantes donde intervenir, debiéndose tener en cuenta a la hora del diseño y construcción de un edificio.

A parte de que sean zonas de pérdidas y/o ganancias de calor, si un puente térmico no se trata correctamente hay riesgo de aparición de condensaciones, tanto superficiales como intersticiales debido al cambio de flujo de calor. Hay varios artículos que ponen de manifiesto que los puentes térmicos generan pérdidas energéticas importantes.

Theodosiou & Papadopoulos (2008) tras analizar un edificio con fachadas de dos hojas de ladrillo con aislamiento intermedio, concluye que las pérdidas térmicas reales de un edificio teniendo en cuenta los puentes térmicos son un 35% superiores a las pérdidas térmicas que se obtendrían despreciando el valor de los puentes térmicos.

Baba & Ge (2015) concluyen que, para climas fríos, la existencia de puentes térmicos aumenta en un 18% la carga térmica anual. Mientras que, para climas cálidos, la presencia de puentes térmicos aumenta en un 30% la carga anual de calefacción y en un 20% la carga de refrigeración anual.

Kotti, Teli, & James (2017) concluyen que casi una quinta parte (cerca del 20%) de las pérdidas de calor que se producen son debidas a los puentes térmicos. Otra conclusión a la que llega con su estudio es que minimizar los puentes térmicos supone una reducción de prácticamente un 12% de las facturas de energía anual.

Por último, García Tormo (2022), en el estudio que realiza de puentes térmicos en pilares integrados de fachada tradicional, afirma que los puentes térmicos son una consecuencia negativa de la ejecución de una fachada tradicional. Esto puede suponer un riesgo para la salud de los ocupantes debido a las fugas energéticas y condensaciones que provocan.

El Documento Básico de Salubridad establece, en su punto 5.1.3.1, como condición para el aislamiento térmico de la fachada, que debe colocarse de forma continua y estable, la existencia de puentes térmicos indica justamente lo contrario, lo que supondría un problema para la salubridad.

Aparte de las pérdidas energéticas, los puentes térmicos también están relacionados directamente con la producción de condensaciones. Los puentes térmicos pueden causar variaciones en la temperatura de las superficies interiores de los cerramientos, pudiendo crear áreas frías en la envolvente del edificio, lo que puede producir la aparición de humedades, mohos o problemas de calidad del aire interior. Cuando se habla de condensaciones hay que diferenciar entre dos tipos de condensaciones, la intersticiales y las superficiales.

Las condensaciones intersticiales son las más importantes en lo que respecta al comportamiento térmico de los materiales, puesto que son las que afectan de forma significativa al comportamiento de estos, mermando sus propiedades, disminuyendo su vida útil y como consecuencia directa disminuyendo la vida útil del edificio.

Las condensaciones superficiales representan principalmente un riesgo para la salubridad, ya que son las culpables de la formación de moho, y sus exigencias se recogen en el Documento Básico de Salubridad DB-HS.

Dada la importancia que tiene la formación de condensaciones, la norma UNE-EN ISO 13788 (AENOR, 2016) tiene un apartado dedicado a la exposición de un método para el diseño de la envolvente térmica del edificio con la finalidad de evitar efectos negativos como son la producción de moho y la aparición de condensaciones superficiales.

El DA-DB-HE-3, uno de los anexos del DB-HE, en su punto 4 afirma que uno de los efectos de un puente térmico es el *“aumento del riesgo de formación de condensaciones”* debido a que un puente térmico es una zona fría de la envolvente y son más propicios a las condensaciones. En el mismo punto también dice que *“Las condensaciones superficiales suponen un riesgo para la salud al propiciar la formación de moho, habiéndose comprobado que este riesgo se incrementa significativamente al mantenerse una humedad relativa superior al 80% en una superficie durante varios días.”*

Sobre este tema, son varios los artículos que hablan de enfermedades a causa de las humedades producidas en el interior del hogar, lo que está directamente relacionado con los puentes térmicos y la formación de condensaciones.

Dales, Burnett, & Zwanenburg (1991) hablan sobre la importancia que tiene el entorno interior en la salud y se plantean la hipótesis de que la humedad en el hogar puede aumentar la concentración de alérgenos como moho y ácaros, pudiendo estar relacionado con una ventilación deficiente.

Dotterud, Odland, & Falk (2000) hacen una comparación de enfermedades como el eccema, asma y la rinoconjuntivitis alérgica en adultos en dos áreas geográficamente relacionadas mediante dos estudios de cuestionario idénticos. Se encontró en una de las dos áreas geográficas estudiadas que las enfermedades atópicas fueron más del doble. Una posible hipótesis que se plantea para estas causas es que las humedades interiores, los suelos con moqueta y la contaminación puede resultar la razón principal de esta diferencia.

Macari Urra (2013) menciona alguno de los problemas que supone la formación de condensaciones, entre ellos comenta que las condensaciones favorecen a la formación de hongos que pueden llegar a ser perjudiciales para la salud. Que, a su vez, estos hongos pueden ser un problema para el edificio, produciendo el deterioro de los materiales orgánicos. En este mismo estudio menciona la importancia y conveniencia de aislar la envolvente de un edificio por la cara exterior, para evitar que se encuentre más frío, reduciendo así el riesgo de condensaciones intersticiales.

Chen, Tsai, & Lee (2011) busca explorar la relación entre la exposición a algunos factores, entre ellos a la humedad, durante la infancia y el desarrollo de asma en niños. Concluyendo que la exposición a factores como moho visible y olores a humedad durante la infancia estaba relacionado con un mayor riesgo de asma.

Díaz Regodón & Tenorio Ríos (2005) muestran que los problemas derivados de los puentes térmicos son las pérdidas de energía, la formación de condensaciones y la formación de moho. Mencionan la importancia de evitar ciertos puentes térmicos en la fase de diseño de un edificio, y los que sean inevitables deben construirse buscando que el riesgo de condensaciones sea mínimo, evitando así la futura formación de moho.

Vista la importancia de los puentes térmicos, se entiende que uno de los documentos de apoyo del Documento Básico de Ahorro de energía, en concreto en el DA-DB-HE-3 (Ministerio de Fomento, 2014) sea dedicado única y exclusivamente a estos, en este documento se explican los conceptos básicos y los métodos de cálculo de puentes térmicos, las condensaciones superficiales en puentes térmicos y elabora un atlas de puentes térmicos.

El DA-DB-HE-3 describe una serie de métodos de cálculo empleados usualmente en el cálculo de puentes térmicos.

Estos métodos lo que pretenden es obtener el valor de la transmitancia térmica lineal, la cual se mide en $W/(m \cdot K)$ y, conforme al “DB-HE ANEJO A Terminología”, se define como el “*flujo de calor, en régimen estacionario, para una longitud y diferencia de temperaturas unitarias de los medios situados a cada lado del puente térmico que se considera*”. En la Tabla 2 se recogen los diferentes métodos de cálculo en función de si son métodos detallados y métodos simplificados.

Los métodos detallados se pueden realizar con programas de modelado tridimensional o bidimensional. Los métodos simplificados para el cálculo de puentes térmicos se realizan con métodos simplificados con estimación de ψ , con estimación de L y con factor corrector de U .

Tabla 2. Resumen sobre los diferentes métodos de cálculo de puentes térmicos que contempla el DA-DB-HE-3. Fuente: elaboración propia a partir de información extraída del DA-DB-HE-3.

Método	Subtipo	En qué consiste	Inconvenientes
MÉTODOS DETALLADOS	Con modelado tridimensional	Evaluar el efecto del puente térmico mediante simulación con modelos tridimensionales de cálculo numérico	Coste de modelización alto y proporciona poca información previa a la simulación
	Con modelo bidimensional	Analizar el puente térmico utilizando la ecuación de la transmitancia térmica simplificada (<i>Ecuación 2, p. 51</i>)	Necesidad de obtener los valores de ψ y longitudes de cada puente térmico
MÉTODOS SIMPLIFICADOS	Con estimación de ψ	Los valores de ψ se igualan para cada grupo de encuentros	Los valores de ψ no se obtiene por un cálculo individualizado de cada caso
	Con estimación de L	Los valores de L se estiman según el edificio y sus características	No se realiza una medición in situ y exacta
	Con estimación de U	Se obtiene la componente bidimensional a partir de la unidimensional, como una fracción de esta	No se realiza un cálculo, se hace una estimación aleatoria

En este estudio se va a utilizar un método detallado con modelado bidimensional, en la descripción que hace el documento sobre este cálculo dice lo siguiente: *“Cuando no es posible calcular ψ de forma analítica se utilizan métodos numéricos y software específico de modelado bidimensional ... o se recurre a catálogos o atlas de detalles tipo con valores precalculados, como el que recoge este documento”*

El DA-DB-HE-3 recoge un atlas con los valores de las transmitancias térmicas lineales en base a los siguientes criterios de cálculo: a) salto térmico de 20°C, correspondiente a condiciones de invierno; b) en función de las dimensiones interiores y c) si los valores no los proporciona el atlas se obtienen por interpolación. Con el propósito de comparar los valores proporcionados por el atlas, se fijan para el cálculo de la transmitancia térmica lineal las mismas condiciones fijadas en el documento de apoyo. Este atlas recoge las soluciones constructivas de puentes térmicos más comunes existentes en la edificación y aporta la siguiente clasificación:

- Puentes térmicos integrados en los cerramientos
 - Pilares integrados en los cerramientos de las fachadas
 - Contorno de huecos y lucernarios
 - Cajas de persianas
 - Otros puentes térmicos integrados
- Puentes térmicos formados por encuentro de cerramientos
 - Frentes de forjado en las fachadas
 - Uniones de cubiertas con fachadas
 - Cubiertas con pretil
 - Cubiertas sin pretil
 - Uniones de fachadas con cerramientos en contacto con el terreno
 - Unión de fachada con losa o solera
 - Unión de fachada con muro enterrado o pantalla

- Esquinas o encuentros de fachadas
 - o Esquinas entrantes
 - o Esquinas salientes
- Encuentros de voladizos con fachadas
- Encuentros de tabiquería interior con cerramientos exteriores

Uno de estos grupos es el puente térmico producido por los pilares integrados en los cerramientos de fachadas. Para este estudio se va a tratar este puente térmico en concreto, por varias razones, la principal razón es porque me ha sido concedida una beca para estudiar este puente térmico, aparte de este motivo considero que es un puente térmico que está presente en prácticamente todos los edificios y no de forma puntual. Es un caso de lo más habitual, en todos los edificios con estructuras entramadas o porticadas existen pilares y es importante cuantificar las pérdidas energéticas que se generan por estos elementos estructurales.

Las fachadas son un tipo de cerramiento que forma parte de la envolvente térmica, y son muchos los casos en los que las fachadas se ven interrumpidas por un pilar, al ser interrumpidas se produce un cambio de composición del cerramiento y una penetración completa o parcial de un elemento constructivo con diferente conductividad, como es el caso de un pilar de hormigón armado, esto provoca la aparición de un puente térmico.



Figura 2. Ejemplos de puente térmico de pilares integrados en fachada. Fuente: elaboración propia.

Este documento va a estudiar los puentes térmicos de pilares integrados en los cerramientos de las fachadas, para el cálculo se ha utilizado un método numérico y el software específico de modelado bidimensional THERM, dado que en el atlas se recogen valores de detalles tipo, se pretende comprobar si esos valores coinciden con los resultados que se han calculado, verificando si son fieles a la realidad.

PILARES INTEGRADOS EN FACHADA. ATLAS DE PUENTES TÉRMICOS

Los pilares integrados en fachada sólo contemplan pilares centrales de dimensiones 25x25 cm hasta dimensiones de 35x35 cm, sin tener en cuenta los pilares de esquina.

El atlas diferencia entre las soluciones a las que se le da continuidad al aislamiento en el encuentro con el pilar (Figura 3. Grupo 1 DA-DB-HE-3) y las soluciones constructivas en las que el aislamiento se interrumpe cuando llega al pilar (Figura 4. Grupo 2 DA-DB-HE-3).

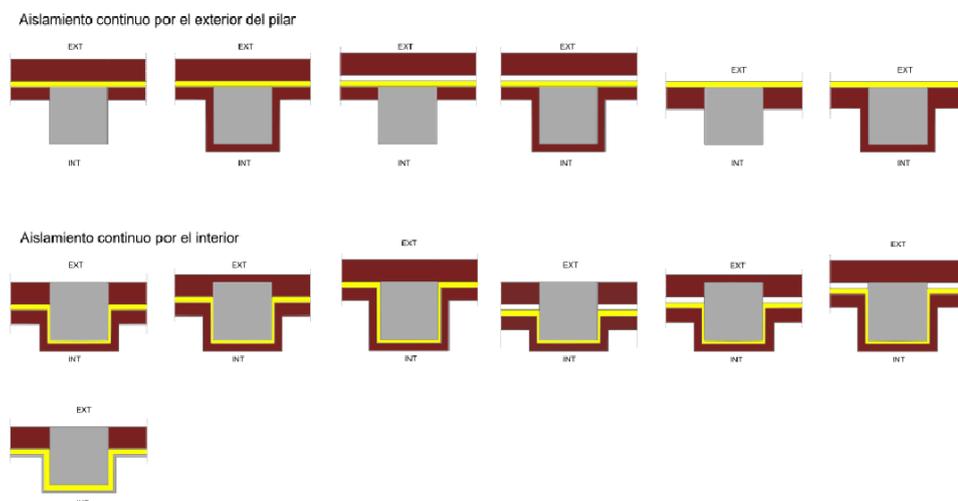


Figura 3. Tipología de fachadas consideradas del Grupo 1. Fuente: anexos DB-HE (Ministerio de la Presidencia, Relaciones con las Cortes y Memoria Democrática, 2022).

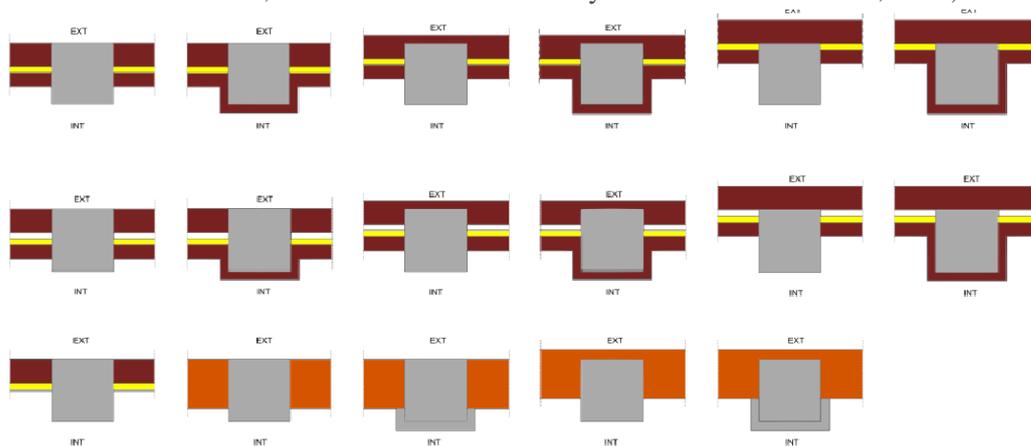


Figura 4. Tipología de fachadas consideradas del Grupo 2. Fuente: anexos DB-HE (Ministerio de la Presidencia, Relaciones con las Cortes y Memoria Democrática, 2022).

Para el Grupo 1 (Figura 3, p. 34), el documento dice que, si la continuidad del aislamiento está bien solucionada, independientemente de si el espesor del aislamiento que continua en el pilar es el mismo, se reduce o aumenta, se obtienen unos valores de puente térmico tan pequeños que son despreciables. La tabla que proporciona es la que se puede ver en la Figura 5.

	Ψ_e, Ψ_i [W/mK]	
	Dimensiones pilar [cm x cm]	
	20x20 / 30x30	
U_{muro} [W/m ² K]	0,73	0,02
	0,44	0,01
	0,31	0,00
	0,27	0,00
	0,24	0,00

Figura 5. Tabla proporcionada por el atlas de puentes térmicos con los valores de transmitancia térmica lineal para el Grupo 1. Fuente: anexos DB-HE (Ministerio de la Presidencia, Relaciones con las Cortes y Memoria Democrática, 2022).

Para el Grupo 2 (Figura 4, p. 34), igual que hace para el Grupo 1, aporta una tabla con valores de transmitancias térmicas lineales, ésta se puede ver en la Figura 6. En este grupo sí que se diferencia el valor del puente térmico según las dimensiones del pilar.

	Ψ_e, Ψ_i [W/mK]			
	Dimensiones pilar [cm x cm]			
	25x25	30x30	35x35	
U_{muro} [W/m ² K]	0,73	1,03	1,20	1,36
	0,44	1,05	1,24	1,40
	0,31	1,00	1,20	1,37
	0,27	0,97	1,17	1,35
	0,24	0,94	1,15	1,32

Figura 6. Tabla proporcionada por el atlas de puentes térmicos con los valores de transmitancia térmica lineal para el Grupo 2. Fuente: anexos DB-HE (Ministerio de la Presidencia, Relaciones con las Cortes y Memoria Democrática, 2022).

Por otro lado, en cuanto al cálculo numérico, la norma UNE-EN ISO 14683 (AENOR, 2020) se limita a decir que el cálculo de la transmitancia térmica lineal se debe realizar según la norma UNE-EN ISO 10211 (AENOR, 2012). Esta última norma describe los criterios que hay que cumplir para elaborar tablas con valores por defecto de transmitancia térmica lineal. Cumpliendo con esas reglas que establece la propia norma, elabora una tabla de valores calculados para la peor situación, y especifica que se pueden utilizar esos valores si no se tienen datos más específicos del puente térmico que se esté calculando.

La norma UNE-EN ISO 14683 agrupa los valores de puentes térmicos en cuatro grupos según la colocación de aislamiento térmico, cara interior, cara exterior, en el medio o en todo. La tabla que proporciona para el caso de pilares integrados en el cerramiento de fachada es la que se puede ver en la Figura 7.

Dimensiones en milímetros
Transmitancia térmica lineal en W/(m·K)

	Fachada		Fachada ligera (incluyendo fábricas aligeradas y fachadas ligeras con entramado)		Capa aislante		Forjado/pilar		Carpintería de los huecos
--	---------	--	---	--	---------------	--	---------------	--	------------------------------

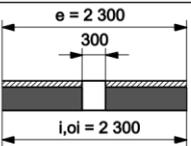
Pilares			
 <p>P1</p> $\psi_e = 1,30$ $\psi_{oi} = 1,30$ $\psi_i = 1,30$	 <p>P2</p> $\psi_e = 1,20$ $\psi_{oi} = 1,20$ $\psi_i = 1,20$	 <p>P3</p> $\psi_e = 1,15$ $\psi_{oi} = 1,15$ $\psi_i = 1,15$	 <p>P4</p> $\psi_e = 0,90$ $\psi_{oi} = 0,90$ $\psi_i = 0,90$

Figura 7. Tabla proporcionada por la norma UNE-EN ISO 14683 de valores de transmitancia térmica lineal para pilares integrados en fachada. Fuente: norma UNE-EN ISO 14683. (AENOR, 2020).

1.2 OBJETIVOS

Los dos objetivos principales que tiene este trabajo son analizar el comportamiento del puente térmico en los pilares integrados en fachada y comparar los valores de transmitancia térmica lineal obtenidos por procedimientos detallados con los proporcionados por el Código Técnico de la Edificación en el DA-DB-HE-3 (Ministerio de Fomento, 2014) obtenidos por procedimientos simplificados.

Como objetivos secundarios se proponen:

1. Elaborar de una base de datos del puente térmico de pilares integrados en fachadas tradicionales de ladrillo caravista y en sistemas de aislamiento térmico por el exterior (SATE).
2. Analizar si el método simplificado es equivalente al método detallado y qué porcentaje de precisión tiene el método simplificado, en caso de tenerlo.
3. Identificar las variables que son determinantes en el cálculo de la transmitancia térmica lineal de un puente térmico.
4. Demostrar la importancia de la continuidad del aislamiento en la totalidad de la envolvente, no interrumpiendo ésta en el encuentro con un pilar.
5. Analizar los diferentes resultados obtenidos para poder recomendar soluciones óptimas del puente térmico en cuestión.
6. Determinar la solución de puente térmico con fachada caravista que puede ser equivalente, por similitud de valores de transmitancia térmica lineal, a una fachada SATE, para supuestos en los que no exista la posibilidad de ejecución de la fachada SATE.

Como hipótesis de trabajo se plantean las siguiente:

Comparativa valores CTE

1. El método simplificado no va a ser equivalente al método detallado, por lo que los valores dados por el atlas de puentes térmicos no van a ser coincidentes con los obtenidos en este trabajo.
2. Los valores aportados por el atlas van a estar infravalorados.

Fachada ladrillo caravista

3. El forrado del pilar reduce el puente térmico.
4. La continuidad del aislamiento térmico en el pilar implica una reducción considerable en el puente térmico.
5. La continuidad del aislamiento por el exterior es mejor solución que la continuidad del aislamiento por el interior produciendo el forrado del pilar
6. No existe solución constructiva que reduzca la pérdida energética cuando el aislamiento es discontinuo en el pilar.
7. Cuando el aislamiento es continuo, la posición del pilar dentro del cerramiento (exterior, embebido o interior) no es una variable influyente.
8. La existencia de una cámara de aire en el cerramiento reduce el valor de la transmitancia térmica lineal.

Fachada SATE

9. Los sistemas de fachada SATE consiguen eliminar por completo el puente térmico.
10. La tipología de fachada SATE con trasdosado de placa de yeso laminado autoportante se va a comportar mejor cuando se coloca aislamiento térmico en su interior que cuando no lo lleva.
11. La tipología de fachada SATE reduce el puente térmico cuando en el pilar por el interior se realiza un forrado con tabiquería cerámica o un trasdosado de placa de yeso laminado autoportante.

Comparativa fachada SATE y fachada caravista

12. La tipología de fachada SATE reduce más el puente térmico en los pilares integrados en fachada que las fachadas de ladrillo caravista.
13. Las soluciones constructivas de fachada de LCV y fachada SATE no son comparables.
14. Las pérdidas energéticas que se producen en los pilares integrados en fachadas son menores cuando se ejecutan fachadas SATE frente a las fachadas que se resuelven con LCV.

1.3 CONSIDERACIONES Y ASPECTOS FORMALES DEL DOCUMENTO

Para la realización de este trabajo ha sido necesaria la utilización de las siguientes herramientas.

- AutoCAD. Software de diseño asistido por ordenador. (Autodesk, 2022)
- Este programa se ha utilizado para la representación gráfica de los detalles constructivos en 2D, obteniendo un archivo en formato .dxf y poder introducirlo en el programa THERM.
- THERM. Software libre para el Análisis de la Transmisión del Calor Bidimensional a través de Elementos constructivos. (Curcija, y otros, 2022)

Este programa se ha utilizado para obtener el valor del flujo de calor que atraviesa el cerramiento y para comparar la U del cerramiento calculada manualmente.

- EXCEL. Programa de hojas de cálculo desarrollado y lanzado por Microsoft. (Microsoft Corporation, 2022)

Utilizado para confeccionar la base de datos de todas las soluciones, para el cálculo de la transmitancia térmica lineal del puente térmico y para la elaboración de gráficos.

- Word. Software informático para procesar texto. (Microsoft Corporation, 2023)

Este programa se ha utilizado para la redacción del trabajo.

- Formato de citación American Psychological Association (APA), conjunto de normas que se utilizan para la citación de fuentes, referencias bibliográficas, documentos científicos, etc. (APA.org, 2022).

1.4 LIMITACIONES

Existen numerosos puntos en la edificación donde se puedan producir puentes térmicos (ver apartado 1.1, p. 21). por lo que se ha tenido que limitar el campo de trabajo. Los puentes térmicos más numerosos en edificación son los encuentros de pilares y forjados con la fachada y los producidos por huecos en las fachadas (contorno del hueco y cajas de persiana).

Debido a la limitación temporal que se ha de dedicar a un TFG, la primera decisión que se ha tomado ha sido elegir el tipo de puente térmico a analizar. Se seleccionan los puentes térmicos integrados en los cerramientos y dentro de este grupo sólo los puentes térmicos de pilares integrados en las fachadas. Dentro de esta tipología se seleccionan las tipologías constructivas de fachada a analizar (ladrillo caravista y SATE).

2 METODOLOGÍA

2.1 POBLACIÓN Y MUESTRA

Las diferentes soluciones constructivas que se han realizado están en función de las variables y tipo de puente térmico que se quiere estudiar. En la propuesta de puente térmico integrado en fachada, se han adoptado los siguientes factores que definen las distintas posibles combinaciones: 1) posición del pilar con respecto a la hoja principal; 2) posición del aislamiento con respecto al pilar; 3) continuidad o no del aislamiento térmico en el pilar; 4) forrado interior del pilar con tabiquería o PYL; 5) disposición de cámara de aire; y 6) relación del espesor del aislamiento en el pilar con respecto al espesor del aislamiento en la hoja principal. Un resumen de todas las combinaciones se incluye en la Tabla 3, donde se recoge la realización de 950 soluciones de fachadas de ladrillo caravista y 150 soluciones de fachadas SATE, para una dimensión de pilar de 25x25 cm.

Tabla 3. Cálculo numérico para valorar el volumen de trabajo que supondría el estudio. Fuente: elaboración propia.

Solución	Variables	Continuidad y posición del aislante con respecto al pilar (esquema conforme al DA-HE3)			Total
		G01 Aisl ext	G01 Aisl int	G02 Aisl sin continuidad	
LCV-115 + AISL + LHD-70	Número de casos distintos	4	6	12	22
	Relación entre el espesor del aislante térmico del pilar y del cerramiento de fachada (0,5; 1,0 y 1,5)	2	3	1	38
	Espesor del aislamiento térmico del cerramiento de fachada (6, 8, 10, 12, 14 cm)	5	5	5	190
	Conductividad térmica del aislamiento (0,029; 0,032...)	5	5	5	950
	Dimensión pilar (25x25)	1	1	1	950
SATE-115	Puentes térmicos (HE)	1	-	-	1
	Espesor aislante cerramiento	5	-	-	5
	Conductividad aislamiento	5	-	-	25
	Dimensión pilares	1	-	-	25

Solución	Variables	Continuidad y posición del aislante con respecto al pilar (esquema conforme al DA-HE3)			Total
		G01 Aisl ext	G01 Aisl int	G02 Aisl sin continuidad	
SATE-115 + forrado cerámico	Puentes térmicos (HE)	1	-	-	1
	Espesor aislante cerramiento	5	-	-	5
	Conductividad aislamiento	5	-	-	25
	Dimensión pilares	1	-	-	25
SATE-115 + forrado aislamiento PYL-48	Puentes térmicos (HE)	1	-	-	1
	Espesor aislante cerramiento	5	-	-	5
	Conductividad aislamiento	5	-	-	25
	Dimensión pilares	1	-	-	25
SATE-115 + trasdosado aislamiento PYL-48	Puentes térmicos (HE)	1	-	-	1
	Espesor aislante cerramiento	5	-	-	5
	Conductividad aislamiento	5	-	-	25
	Dimensión pilares	1	-	-	25
SATE-115 + forrado aire PYL-48	Puentes térmicos (HE)	1	-	-	1
	Espesor aislante cerramiento	5	-	-	5
	Conductividad aislamiento	5	-	-	25
	Dimensión pilares	1	-	-	25
SATE-115 + trasdosado aire PYL-48	Puentes térmicos (HE)	1	-	-	1
	Espesor aislante cerramiento	5	-	-	5
	Conductividad aislamiento	5	-	-	25
	Dimensión pilares	1	-	-	25

Una vez realizados y analizados los resultados de cada uno de los casos se observa que existen soluciones que se repiten de forma accidental a la hora de combinar los diferentes criterios, por lo que se decide descartarlas por no aportar información relevante. Las soluciones constructivas descartadas son las que se explican a continuación.

- Grupo 2 (discontinuidad en el aislamiento). Solución con pilar exterior, con cámara de aire se diferencian dos soluciones, con forrado del pilar y sin forrado del pilar, se descarta la solución de sin forrado, a causa de la dimensión del cerramiento (más grande que el pilar) se produce un forrado accidental por lo que no se va a apreciar la diferencia real entre uno y otro. (Figura 8). Lo que supone descartar un total de 25 soluciones constructivas.

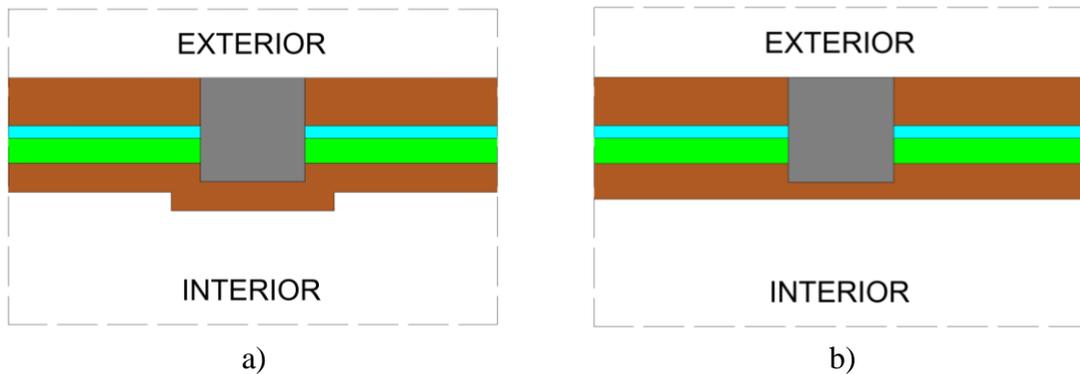


Figura 8. Solución constructiva pilar exterior, con cámara de aire y con forrado del pilar (a) y solución constructiva con forrado accidental (b). Fuente: elaboración propia.

- Grupo 2 (discontinuidad en el aislamiento). Solución con pilar exterior, sin cámara de aire se diferencian dos soluciones, con forrado del pilar y sin forrado del pilar, se descarta la solución de sin forrado a partir de un espesor de aislamiento de 8 cm por el forrado accidental que se produce (Figura 9). Lo que supone descartar un total de 20 soluciones constructivas.

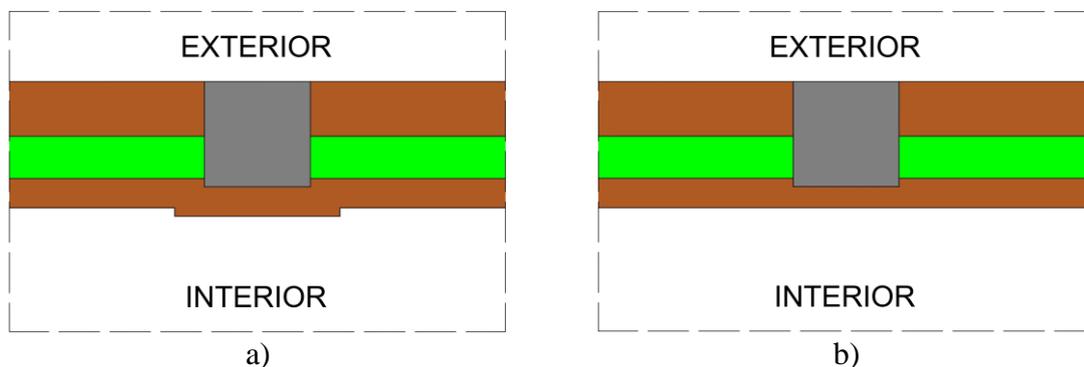


Figura 9. Solución constructiva pilar exterior, sin cámara de aire y con forrado del pilar (a) y solución constructiva con forrado accidental (b). Fuente: elaboración propia.

- Grupo 2 (discontinuidad en el aislamiento). Solución con pilar embebido, sin cámara de aire se diferencian dos soluciones, con forrado del pilar y sin forrado del pilar, se descarta la solución de sin forrado a partir de un espesor de aislamiento de 12 cm por el forrado accidental que se produce (Figura 10). Lo que supone descartar un total de 10 soluciones constructivas.

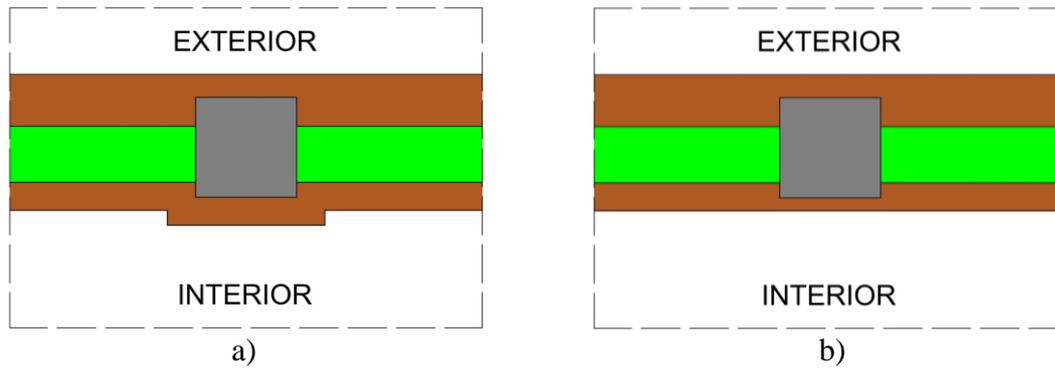


Figura 10. Solución constructiva pilar embebido, sin cámara de aire y con forrado del pilar (a) y solución constructiva con forrado accidental (b). Fuente: elaboración propia.

- Grupo 2 (discontinuidad en el aislamiento). Solución con pilar embebido, con cámara de aire se diferencian dos soluciones, con forrado del pilar y sin forrado del pilar, se descarta la solución de sin forrado a partir de un espesor de aislamiento de 12 cm por el forrado accidental que se produce (Figura 11). Lo que supone descartar un total de 15 soluciones constructivas.

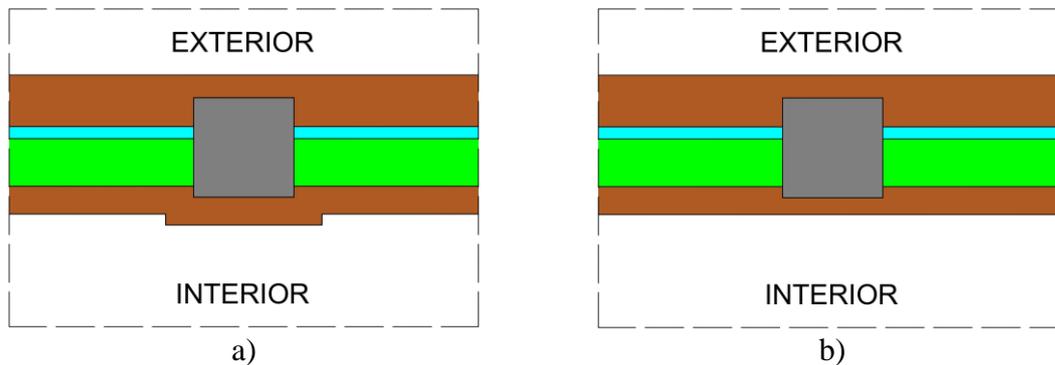


Figura 11. Solución constructiva pilar embebido, con cámara de aire y con forrado del pilar (a) y solución constructiva con forrado accidental (b). Fuente: elaboración propia.

Una vez se han revisado todas las combinaciones se dispone de una muestra final de 880 casos para fachada tradicional y 150 casos para sistemas de aislamiento por el exterior (SATE).

2.2 PROCEDIMIENTO

Para alcanzar los objetivos que se pretenden con este trabajo lo primero que se realizó fue la delimitación del campo de trabajo. Para ello se establecieron las tipologías de fachadas y las dimensiones de los pilares que han sido objeto de este TFG (ver apartado 1.4, p. 41).

Se han utilizado dos tipologías de fachada. La primera, fachada tradicional por ser la más habitual. Dentro de esta tipología se utilizan las siguientes soluciones, que se codifican conforme el Catálogo de Elementos Constructivos (Ministerio de Fomento, 2011) en:

- Fábrica vista, aislamiento por el interior y sin cámara de aire (código F 1.1, Figura 12, p. 48) o con cámara de aire (código F 1.2, Figura 13, p. 48). La Tabla 4 resume los materiales utilizados, espesores y conductividad térmica conforme a los valores del CTE, que se utilizarán para el cálculo de la transmitancia térmica.

Tabla 4. Composición de fachada correspondiente a la tipología F1.1-1.2 del Catálogo de Elementos Constructivos. Fuente: elaboración propia.

Capa	Material	Espesor (cm)	Conductividad [W/(m·K)]
1	Ladrillo perforado	11,5	0,543
2	Mortero de cemento	1,5	0,550
3	Cámara de aire sin ventilar	3,0	0,173
4	Aislamiento térmico	Variable: 6, 8, 10, 12 y 14	Variable: 0,029; 0,032; 0,034; 0,036 y 0,040
5	Ladrillo hueco	7,0	0,375
6	Yeso	1,5	0,430

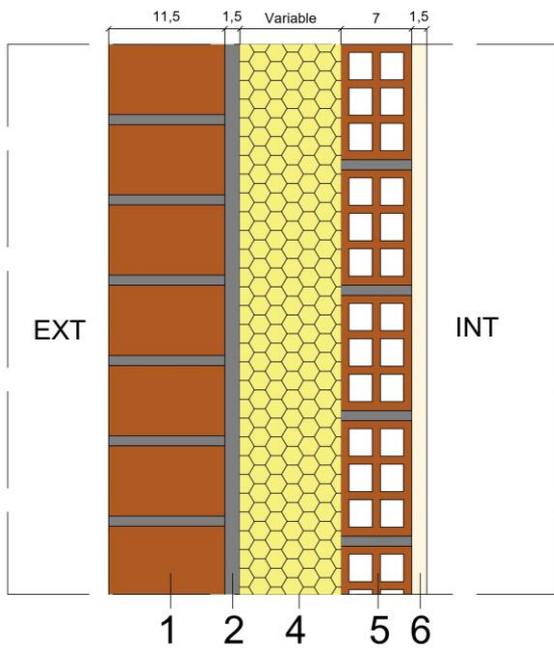


Figura 12. Composición fachada código F 1.1.
Fuente: elaboración propia.

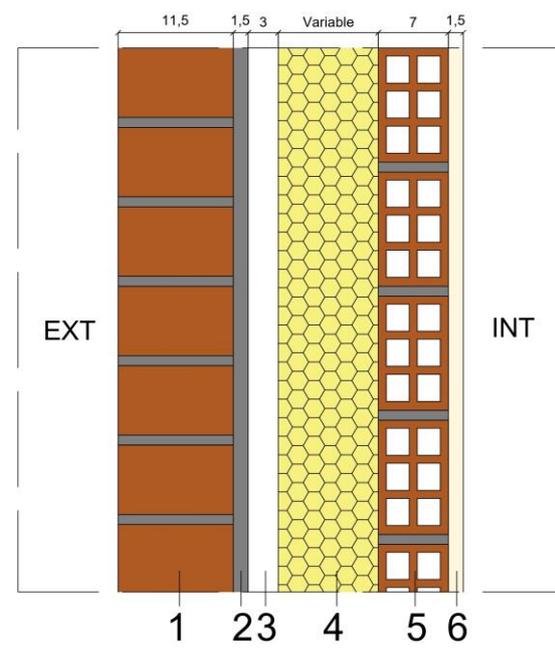


Figura 13. Composición fachada código F 1.2.
Fuente: elaboración propia.

La segunda tipología es una fachada con un sistema aislamiento térmico por el exterior (SATE) por ser la que mejores prestaciones térmicas ofrece. Al igual que en el caso anterior se codifica conforme el Catálogo de Elementos Constructivos (Ministerio de Fomento, 2011)

- Hoja principal de fábrica de ladrillo cerámico perforado con revestimiento continuo, aislamiento por el exterior y sin cámara de aire o con cámara de aire no ventilada (código F 4.1, Figura 14, p. 49). La Tabla 5 resume los materiales utilizados, espesores y conductividad térmica conforme a los valores del CTE, que se utilizarán para el cálculo de la transmitancia térmica.

Tabla 5. Composición de fachada correspondiente a la tipología F4.1 del Catálogo de Elementos Constructivos. Fuente: elaboración propia.

Capa	Material	Espesor (cm)	Conductividad [W/(m·K)]
1	Mortero de cemento	1,0	0,550
2	Aislamiento térmico	Variable: 6, 8, 10, 12 y 14	Variable: 0,029; 0,032; 0,034; 0,036 y 0,040
3	Ladrillo perforado	11,5	0,543
4	Yeso	1,5	0,430
5	Trasdoso de placa de yeso laminada con cámara de aire	4,8 + 1,5	0,2677 + 0,250
6	Trasdoso de placa de yeso laminada con aislamiento	4,8 + 1,5	Variable + 0,250

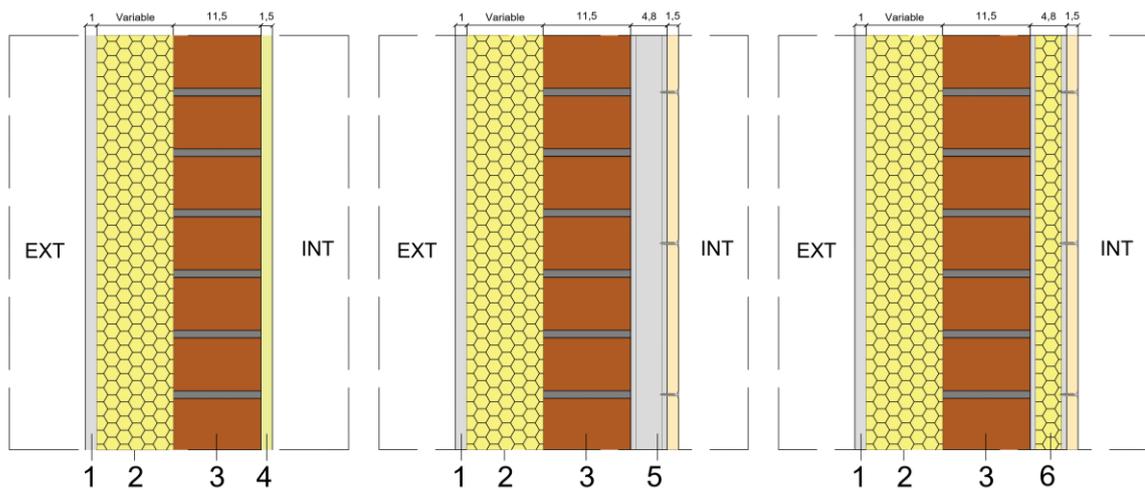
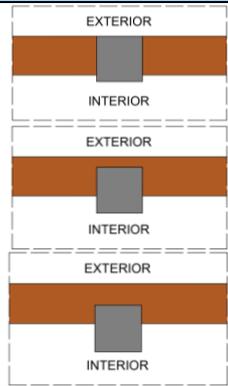
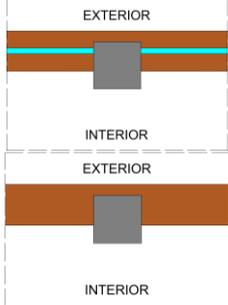
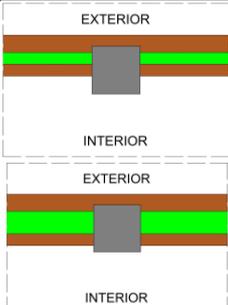
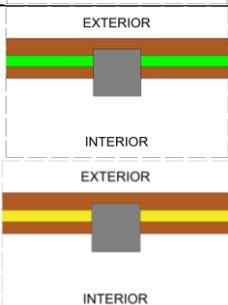
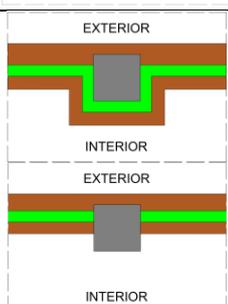


Figura 14. Composición fachada código F 4.1. Fuente: elaboración propia.

Por otro lado, se ha seleccionado un pilar de dimensiones 25x25 cm para realizar este estudio, debido a que variar las dimensiones del pilar supondría un aumento de casos sustancial y el campo de estudio quedaría demasiado amplio.

A continuación, se establecieron como variables los parámetros básicos que aparecen en la Tabla 6 (p. 50) considerados como los más relevantes a la hora de obtener el valor de la transmitancia lineal del pilar (puente térmico), para poder estudiar y comparar las diferentes soluciones que se pueden aplicar a la hora de minimizar el puente térmico.

Tabla 6. Variables para analizar el comportamiento del puente térmico. Fuente: elaboración propia.

Variable	Soluciones	Esquema soluciones
Posición del pilar	Exterior/Embebido/Interior	
Cámara de aire	Con cámara/Sin cámara	
Espesor del aislamiento	6/8/10/12/14 cm	
Conductividad del aislamiento	0,029/0,032/0,034/0,036/0,040 [W/(m·K)]	
Continuidad del aislamiento	Continuo/Discontinuo	

El valor de la transmitancia térmica lineal (ψ), se ha obtenido utilizando las fórmulas que proporciona el DA-DB-HE-3, partiendo de la Ecuación 1, proporcionada en uno de los anexos del DB-HE (Ministerio de Fomento, 2014): Fórmula para el cálculo de la transmisión de calor a través de la envolvente térmica, entre los ambientes interiores y exteriores.

$$\phi T = (\Sigma U_i A_i + \Sigma \psi_j L_j + \Sigma \chi_k)(\vartheta_i - \vartheta_e) = U_m A T (\vartheta_i - \vartheta_e) \quad \text{Ecuación 1}$$

Despreciando de esta Ecuación 1 el valor de la transmitancia térmica de los puentes térmicos puntuales ($\Sigma \chi_k$) debido a que el valor es pequeño, y por lo tanto despreciable, se obtiene la Ecuación 2, proporcionada en uno de los anexos del DB-HE (Ministerio de Fomento, 2014): Fórmula para el cálculo de la transmisión de calor a través de la envolvente térmica, entre los ambientes interiores y exteriores, despreciando el valor de los puentes térmicos puntuales.

$$\phi T = (\Sigma U_i A_i + \Sigma \psi_j L_j)(\vartheta_i - \vartheta_e) = U_m A T (\vartheta_i - \vartheta_e) \quad \text{Ecuación 2}$$

Despejando esta ecuación, se obtiene la Ecuación 3, proporcionada en uno de los anexos del DB-HE (Ministerio de Fomento, 2014), con la que se obtiene la transmitancia térmica lineal del pilar.

$$\psi L = \frac{\phi 2D}{(\vartheta_i - \vartheta_e)} - \Sigma A_i U_i \quad \text{Ecuación 3}$$

A continuación, se desglosa cómo se obtienen los valores de la Ecuación 3.

DIFERENCIA DE TEMPERATURAS ($\vartheta_i - \vartheta_e$)

Conforme al apartado 5.1 del DA-DB-HE-3 (Ministerio de Fomento, 2014), el salto térmico empleado es el relativo a las condiciones de invierno y es de 20°C. Puesto que la temperatura interior del diseño (ϑ_i) debe ser de 20°C y la exterior de diseño (ϑ_e) de 0°C.

SUPERFICIE A LA QUE SE APLICA EL VALOR U_i (A_i).

Para los puentes térmicos de pilares integrados en fachada la superficie a la que se aplica el valor de la transmitancia térmica (U_i) es la superficie del cerramiento. Esta superficie se puede considerar equivalente a la longitud, porque al seccionar se ha considerado que la profundidad es de 1m.

Existen dos formas de calcular un puente térmico, por longitudes interiores o exteriores, la mayoría de los programas de cálculo de puentes térmicos en España modelizan por el interior, por lo que se debe calcular con la longitud interior del puente térmico. Si no se supiera por dónde modeliza el programa con el que se está trabajando, también es recomendable trabajar con la longitud interior, puesto que haciéndolo con las dimensiones interiores el valor que resta en la Ecuación 3 (p. 51) resultaría más pequeño, y como consecuencia el valor de la transmitancia térmica lineal sería mayor, por lo que se estaría considerando las condiciones más desfavorables y se quedaría el resultado del lado de la seguridad. Ver Figura 15 para ver el significado del puente térmico según la superposición.

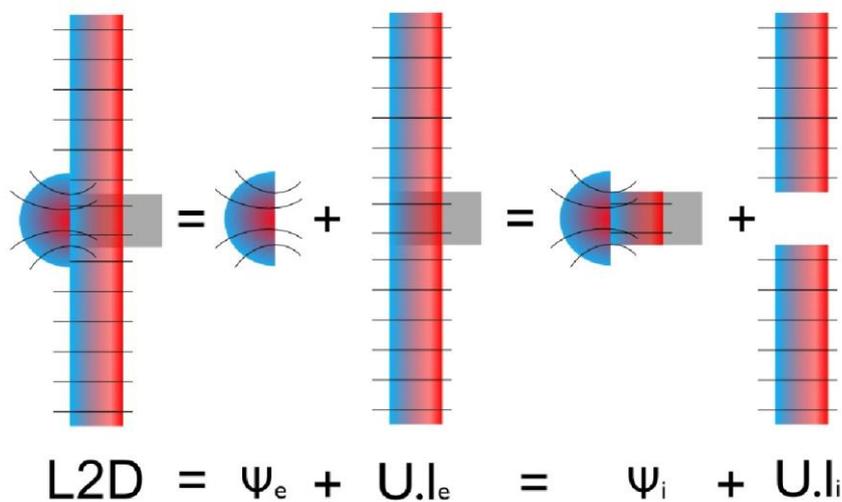


Figura 15. Representación de flujos unidimensionales y bidimensionales, y la relación entre ψ_e y ψ_i según se tomen dimensiones exteriores o interiores. Fuente: Figura 4. Significado de ψ según la superposición. Del DA-DB-HE-3.

La longitud que se mide desde el exterior en el caso del puente térmico trabajado es continua y va desde un plano de corte a otro, mientras que la interior es la resultante de sumar la distancia del plano de corte al punto en el que la composición del cerramiento es diferente, y por lo tanto es donde empieza el puente térmico, Figura 16 (p. 53).

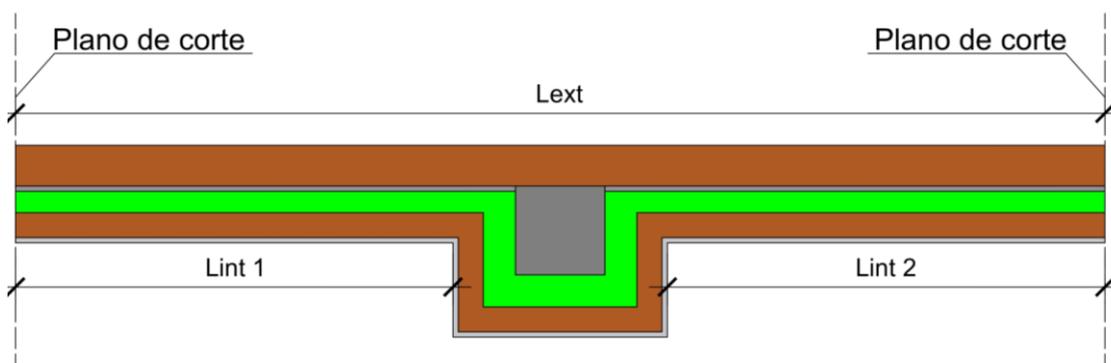


Figura 16. Definición de las longitudes interiores (Lint) y las longitudes exteriores (Lext) para la obtención del valor de A_i . Fuente: elaboración propia.

TRANSMITANCIA TÉRMICA DEL ELEMENTO ADYACENTE (U_i)

El cálculo de la transmitancia térmica viene explicado en los anexos del DB-HE, DA-DB-HE-1 (Ministerio de Transporte, Movilidad y Agenda Urbana, 2020), el procedimiento explicado en este documento de apoyo y el que se ha seguido para el cálculo es el siguiente.

La Ecuación 4, proporcionada en DA-DB-HE-1 (Ministerio de Transporte, Movilidad y Agenda Urbana, 2020), es la fórmula para el cálculo de la transmitancia térmica “U” ($W/(m^2 \cdot K)$).

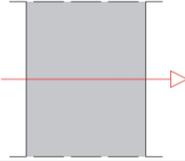
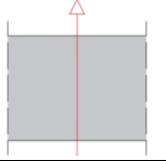
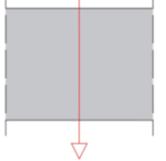
$$U = \frac{1}{R_t} \quad \text{Ecuación 4}$$

Para poder aplicar la Ecuación 4 antes hay que calcular la resistencia térmica total del componente constructivo (R_t ($m^2 \cdot K/W$)), en este caso del cerramiento de fachada, al ser un componente formado por capas homogéneas, térmicamente hablando, la Ecuación 5, proporcionada en uno de los anexos del DB-HE (Ministerio de la Presidencia, Relaciones con las Cortes y Memoria Democrática, 2022), representa la fórmula para el cálculo de la resistencia térmica total del cerramiento.

$$R_t = R_{si} + R_1 + R_2 + \dots + R_n + R_{se} \quad \text{Ecuación 5}$$

R_{si} y R_{se} corresponde a los valores de las resistencias térmicas superficiales, exterior e interior, tomadas de los valores de la Tabla 7 (p. 54), valores extraídos del DA-DB-HE-1 (Ministerio de Transporte, Movilidad y Agenda Urbana, 2020).

Tabla 7. Resistencia térmica superficial de cerramientos en contacto con el aire exterior en función de la posición de cerramiento y el sentido del flujo. Fuente: elaboración propia a partir de la Tabla 1 del DA-DB-HE-1.

Posición del cerramiento y sentido del flujo de calor		Rse	Rsi
Cerramientos verticales o con pendiente sobre la horizontal >60° y flujo horizontal		0,04	0,13
Cerramientos horizontales o con pendiente sobre la horizontal ≤60° y flujo ascendente (techo)		0,04	0,10
Cerramientos horizontales y flujo descendente (suelo)		0,04	0,17

Los valores de $R_1, R_2 \dots R_n$ ($(m^2 \cdot K)/W$), corresponden con el valor de la resistencia térmica de cada una de las capas que componen el cerramiento, el valor de la resistencia térmica de una capa se obtiene a partir de la Ecuación 6, proporcionada en el DA-DB-HE-1 (Ministerio de Transporte, Movilidad y Agenda Urbana, 2020).

$$R = \frac{e}{\lambda} \quad \text{Ecuación 6}$$

La Ecuación 6 no es aplicable a las cámaras de aire, el DA-DB-HE-1 (Ministerio de Transporte, Movilidad y Agenda Urbana, 2020) diferencia entre cámaras de aire no ventiladas, cámaras de aire ligeramente ventiladas y cámara de aire muy ventiladas. Para este trabajo se analizó únicamente cámaras de aire no ventiladas, la Tabla 8 (p. 55) de este documento que se corresponde con la Tabla 2 proporcionada por el documento de apoyo para la resistencia térmica de cámaras de aire no ventiladas. Para poder aplicar estos valores hay que cumplir los siguientes puntos que establece el DA-DB-HE-1: “*esté limitada por dos superficies paralelas entre sí y perpendiculares a la dirección del flujo de calor y cuyas emisividades sean superiores a 0,8; tengan un espesor menor a 0,1 veces cada una de las otras dos dimensiones y no mayor a 0,3 m; no tenga intercambio de aire con el ambiente interior.*” (Ministerio de Transporte, Movilidad y Agenda Urbana, 2020).

Tabla 8. Resistencia térmica de cámaras de aire no ventiladas [(m²·K)/W] Fuente: elaboración propia a partir de la Tabla 2 del DA-DB-HE-1.

Espesor (cm)	Horizontal	Vertical
1	0,15	0,1500
2	0,16	0,1700
5	0,16	0,1800

Para el estudio se utilizó una cámara de aire de 3 cm de espesor, valor que no aporta directamente la Tabla 8, pero se puede obtener por interpolación de valores, por lo que la tabla de valores empleada finalmente es la Tabla 9, que corresponde a la tabla de la normativa con una fila extra obtenida por interpolación de valores.

Tabla 9. Resistencia térmica de cámaras de aire no ventiladas [(m²·K)/W] con valores extra obtenidos por interpolación. Fuente: elaboración propia a partir de la Tabla 2 del DA-DB-HE-1.

Espesor (cm)	Horizontal	Vertical
1	0,15	0,1500
2	0,16	0,1700
3	0,16	0,1733
5	0,16	0,1800

En la Figura 17 se muestra la composición de una fachada caravista objeto de estudio y en la Tabla 10 se muestran los materiales que componen la fachada con sus espesores, conductividad y resistencia térmica. Los valores de la conductividad son los del Catálogo de Elementos Constructivos (Ministerio de Fomento, 2011).

Tabla 10. Ejemplo de cálculo resistencia térmica de las diferentes capas de una fachada caravista. Fuente: elaboración propia.

Sección constructiva	Id	Materiales	espesor (m)	λ (W/m·K)	R (m ² ·K/W)
<p>Figura 17. Detalle constructivo fachada caravista. Fuente: elaboración propia.</p>	1	Rsi	-	-	0,13
	2	Enlucido de yeso	0,02	0,43	0,03
	3	Ladrillo hueco	0,07	0,38	0,19
	4	Cámara de aire	0,03	-	0,17
	5	Aislamiento térmico	0,06	0,03	2,07
	6	Mortero de cemento	0,02	0,55	0,03
	7	Ladrillo perforado	0,12	0,54	0,21
	8	Rse	-	-	0,04

Con las resistencias térmicas de las capas se aplicó la Ecuación 4 (p. 53) y se obtuvo el valor de la transmitancia térmica del cerramiento.

$$U = \frac{1}{0,13+0,03+0,19+0,17+2,07+0,03+0,21+0,04} = 0,3481 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

Este valor también se puede obtener en los resultados que aporta la simulación que realiza el THERM y que se utilizó para comprobar que los materiales introducidos en el programa eran correctos, Figura 18.

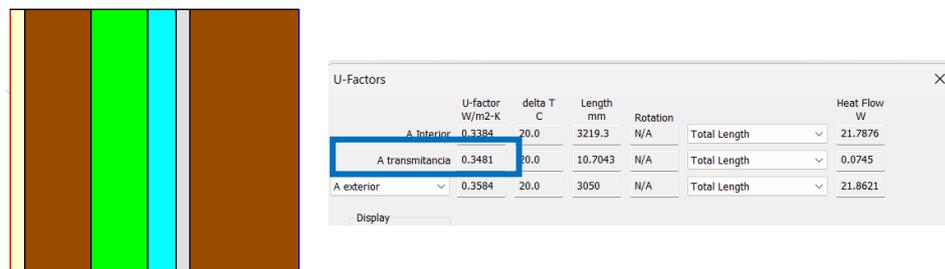


Figura 18. Cálculo de la transmitancia con el programa THERM para hacer la comprobación de que los materiales se han introducido correctamente en el programa. Fuente: elaboración propia a partir de la simulación realizada en THERM.

FLUJO DE CALOR A TRAVÉS DEL ELEMENTO ANALIZADO MEDIANTE UN MODELO BIDIMENSIONAL ($\phi 2D$)

El elemento analizado mediante modelo bidimensional en el caso concreto de este TFG es el de un pilar integrado en el cerramiento de fachada. Para obtener el flujo de calor atraviesa través del cerramiento se ha utilizado el programa THERM. El dibujo del detalle se puede realizar en el propio programa o mediante programas de diseño, en este caso el modelado se realizó en AutoCAD (Autodesk, 2022). En la Figura 19 (p. 57) se ve el dibujo de uno de los detalles que se realizaron, este se guardó con formato .dxf y posteriormente se introdujo en el programa THERM.

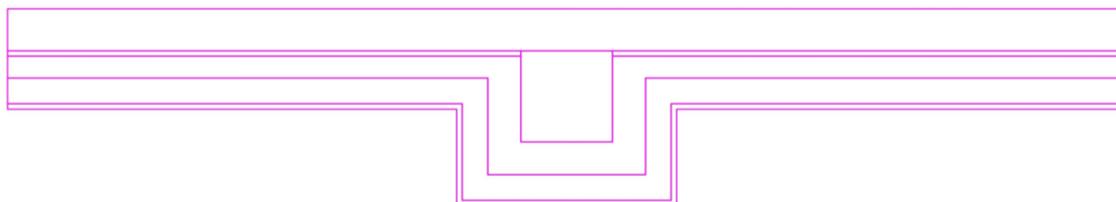


Figura 19. Dibujo de la forma simplificada de un detalle constructivo en AutoCAD para introducirlo posteriormente en el programa THERM. Fuente: elaboración propia.

El detalle constructivo está delimitado por los planos de corte, son los planos que separan el modelo geométrico, en este caso bidimensional, del resto de la construcción (AENOR, 2012). Estos planos deben cumplir una distancia mayor o igual de 1 m o bien una distancia mayor o igual a tres veces el espesor del elemento seccionado, en ambos casos desde el punto en el que la composición del cerramiento cambia con respecto al resto de la construcción. A esta distancia se la conoce como “ d_{\min} ”, Figura 20.

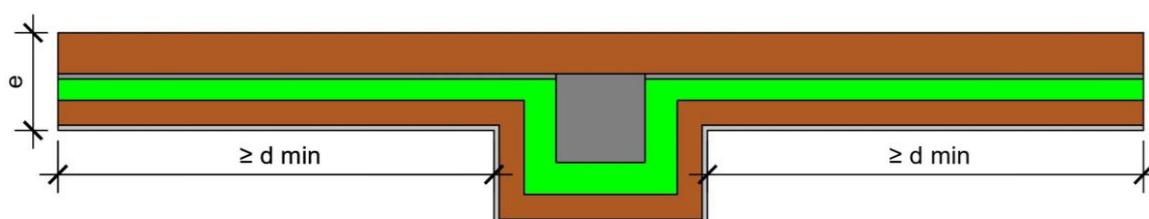


Figura 20. Separación de los planos de corte (d_{\min}). Fuente: elaboración propia.

Para este estudio se ha considerado una dimensión total exterior de 3,05 m, siendo esta dimensión en todos los casos de estudio superior a 1 m a ambos lados del puente térmico y a tres veces el espesor del muro, para contemplar cualquier cambio de dimensión del pilar en futuras investigaciones. De esta forma siempre se cumplirán con los criterios mínimos que establece la norma UNE-EN ISO 10211 (AENOR, 2012) para la distancia de los planos de corte.

Una vez modelado el detalle constructivo (Figura 19) se introdujo en el programa THERM (Figura 21, p. 58), donde se le asignaron los materiales correspondientes y se utilizó la librería de Germán Campos (Campos, s.f.) que recoge las conductividades de todos los materiales del CEC (Ministerio de Fomento, 2011).

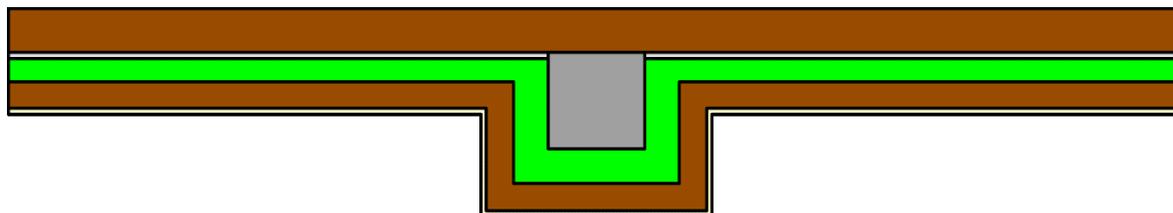


Figura 21. Detalle constructivo introducido en el programa THERM con la asignación de materiales ya realizada. Fuente: elaboración propia.

A continuación, se asignaron las condiciones de contorno, por defecto están todos los contornos exteriores puestos como adiabáticos, “*que no permite el intercambio térmico entre su interior y el exterior.*” (Real Academia Española, 2014), por lo que hay que asignar estas condiciones para asignar una resistencia a esa superficie y tener en cuenta tanto los procesos de convección como los de radiación que tienen lugar en las caras interiores y exteriores del cerramiento que forma parte de la envolvente. Los planos de corte se dejan como adiabáticos.

Cálculo de temperaturas	R_{si} [$m^2 \cdot K/W$]	Cálculo de flujos térmicos	R_{si} [$m^2 \cdot K/W$]
Vidrios	0,13	Flujo vertical ascendente	0,10
Elementos en la mitad superior del espacio	0,25	Flujo horizontal	0,13
Elementos en la mitad inferior del espacio	0,35	Flujo vertical descendente	0,17
		Vidrios	0,13
		Esquinas de elementos	0,20

Valores obtenidos de las normas UNE-EN ISO 6946, UNE-EN ISO 10211, UNE-EN ISO 13788, UNE-EN ISO 10077-1 y UNE-EN ISO 10077-2.

Figura 22. Valor de la resistencia superficial. Fuente: Punto 3.4 del DA-DB-HE-3.

Estos son los valores que proporciona el Documento de Apoyo, pero no son los que se introducen en el programa, los valores proporcionados por este documento están expresados en $(m^2 \cdot K)/W$, mientras que el programa THERM lo pide en $W/(m^2 \cdot K)$, como se puede ver en la Figura 23 (p. 59), por lo que el valor que se introduce es la inversa del proporcionado por el documento de apoyo.

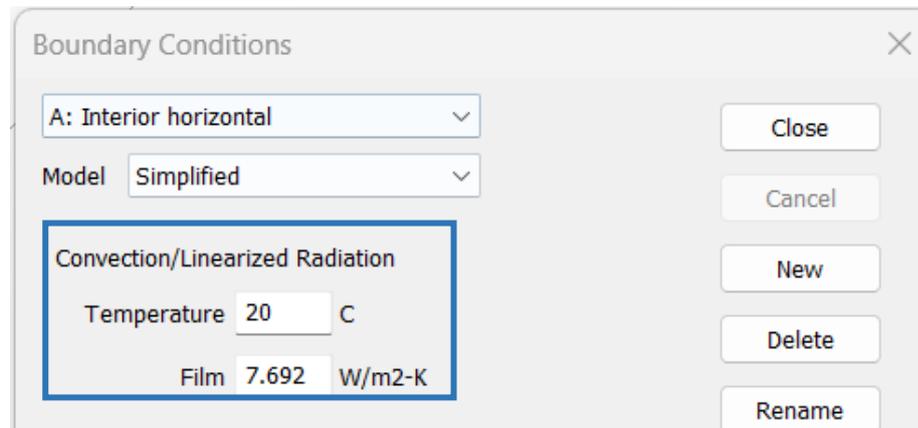


Figura 23. Captura del programa THERM para ver las características que hay que asignar a las condiciones de contorno. Fuente: elaboración propia.

Para el puente térmico estudiado se crearon dos condiciones de contorno, exterior e interior con flujo horizontal, puesto que en el puente térmico de pilares integrados en fachada la fuga de calor se produce horizontalmente, desde el interior hacia el exterior (Figura 24).

- Condición de contorno exterior
 - Temperature (temperatura exterior): 0
 - Film (película = contorno): $1/0,04 = 25$
- Condición de contorno interior con flujo horizontal
 - Temperature (temperatura interior): 20
 - Film (coeficiente de película = condiciones de contorno): $1/0,13 = 7,692$

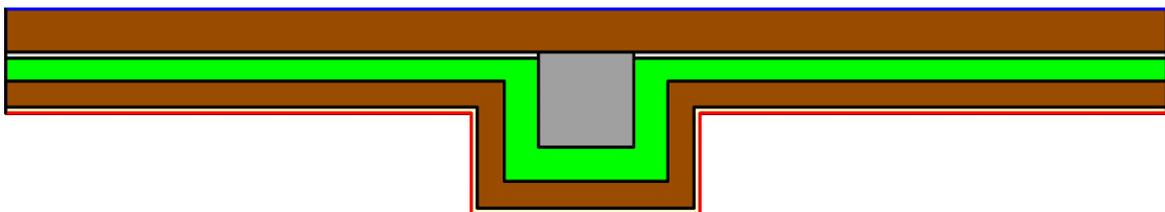


Figura 24. Detalle constructivo introducido en el programa THERM con la asignación de las condiciones de contorno ya hecha. Fuente: elaboración propia.

TRANSMITANCIA TÉRMICA LINEAL (Ψ)

El programa modela el detalle y muestra unos resultados gráficos (Figura 25 y Figura 26) y numéricos (Figura 27). Dentro de los resultados numéricos se incluyen el flujo de calor (Heat Flow) interior y exterior, es decir el valor de $\phi 2D$ y que se utilizará en la Ecuación 3 (p. 51) para calcular el valor de la transmitancia térmica lineal del pilar. Otro de los valores que puede proporcionar el programa es el U factor ($W/(m^2 \cdot K)$), Figura 27, valor que corresponde a la transmitancia térmica del muro.

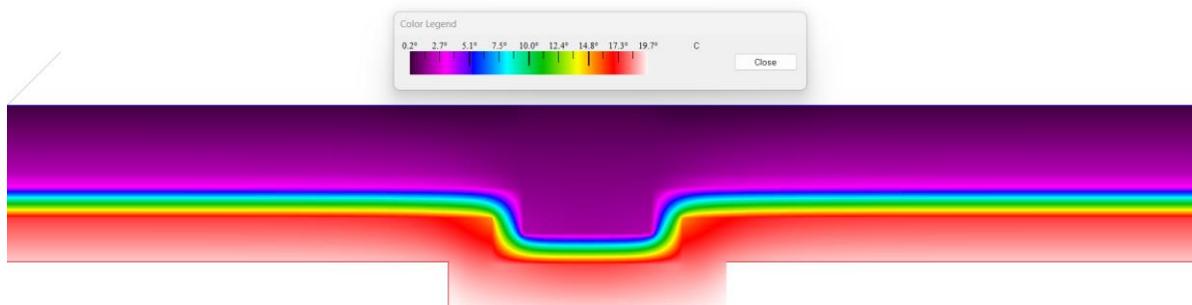


Figura 25. Ejemplo de resultados visuales que proporciona el programa THERM: Infrarrojos.
Fuente: elaboración propia.

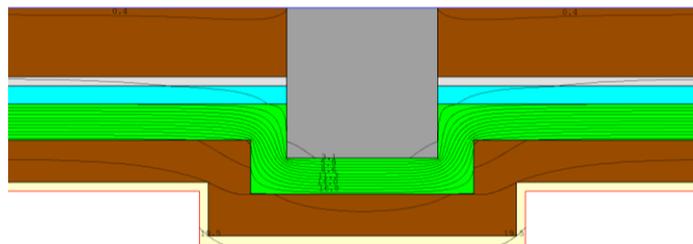


Figura 26. Ejemplo de resultados visuales que proporciona el programa THERM: Isotermas.
Fuente: elaboración propia.

U-Factors		delta T	Length	Rotation	Heat Flow
	U-factor	C	mm		W
	W/m2-K				
A Interior	0.3384	20.0	3219.3	N/A	Total Length 21.7876
A transmitancia	0.3481	20.0	10.7043	N/A	Total Length 0.0745
A exterior	0.3584	20.0	3050	N/A	Total Length 21.8621

Display: U-factor, R-value

% Error Energy Norm: 0.91%

Buttons: Export, OK

Figura 27. Resultados numéricos relevantes obtenidos del programa THERM. Fuente: elaboración propia.

3 CÁLCULO DE PUENTES TÉRMICOS. RESULTADOS

Una vez modelados y calculados los puentes térmicos objeto del presente TFG, se ha realizado un análisis cualitativo de los mismos, para poder analizar el comportamiento del puente térmico. Para ello se utilizarán diagramas de distribución que permitirán el análisis de pares de variables que pueden presentar un patrón de relación o de correlación.

Los resultados que se muestran analizan el comportamiento de las variables que mayor influencia tienen en el puente térmico, es decir, que incrementan o disminuyen la transmitancia lineal del pilar. Al mismo tiempo, estas variables se han clasificado como las “más adecuadas” en función de una serie de criterios constructivos como pueden ser la reducción de la superficie útil del edificio o el coste.

3.1 FACHADA DE LADRILLO CARAVISTA

Para la tipología de fachada con ladrillo caravista se analizan las siguientes variables: la posición del pilar, el forrado del pilar, la existencia de cámara de aire, la relación entre el aislamiento en el cerramiento y en el pilar, buscando las características constructivas más favorables para obtener un valor de transmitancia térmica lineal menor. Para ello el análisis se va a realizar conforme la clasificación del documento de apoyo al DA-DB-HE-3 (Ministerio de Fomento, 2014) en función de la continuidad (Grupo 1) o no (Grupo 2) del aislamiento térmico.

En la Figura 28 (p. 62) están representadas las diferentes variables que se han analizado y las posibles soluciones que se pueden ejecutar combinando las mismas. Aplicando a estas combinaciones los diferentes espesores y las conductividades térmicas del aislamiento térmico se obtiene la totalidad de los casos calculados y analizados en este trabajo.

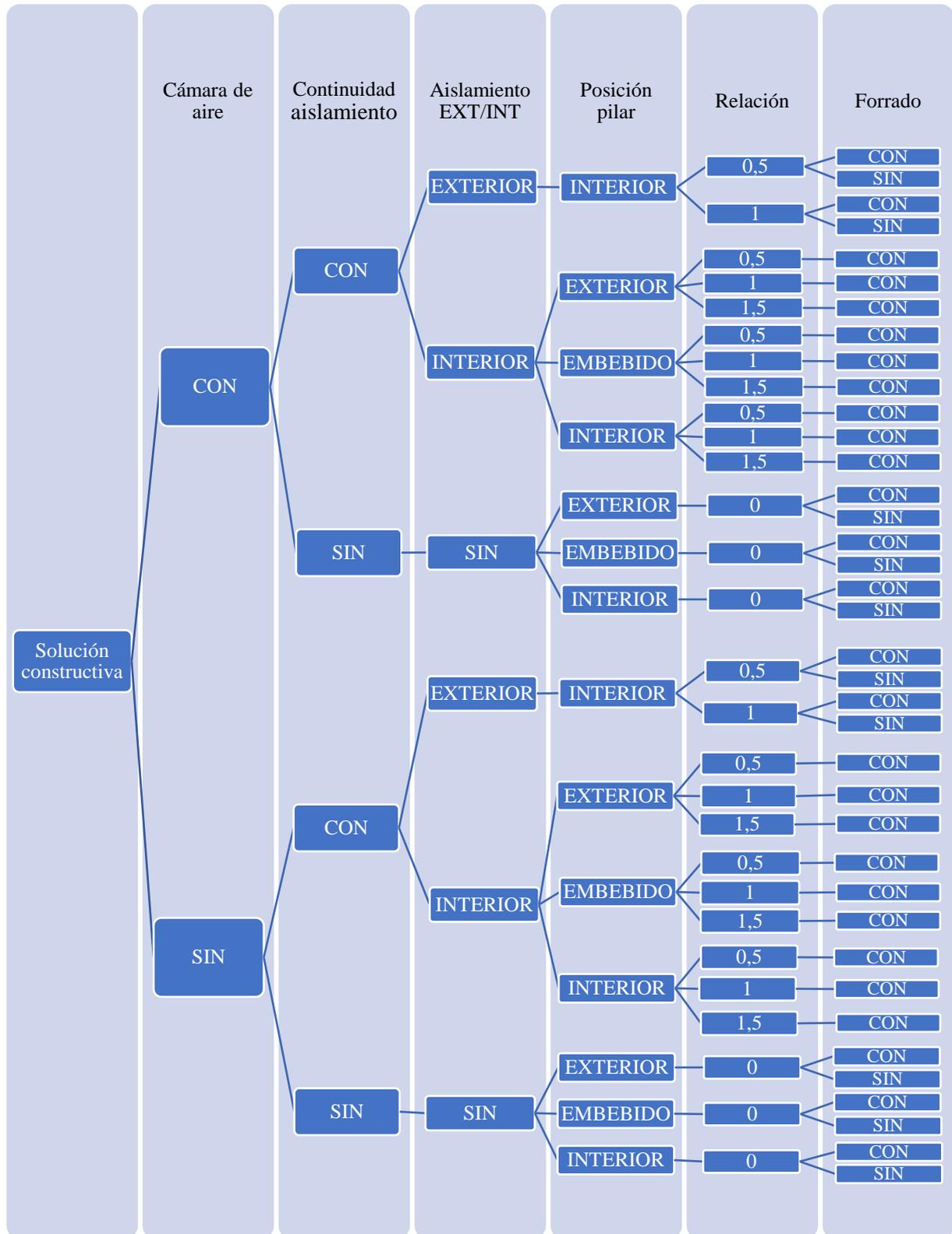


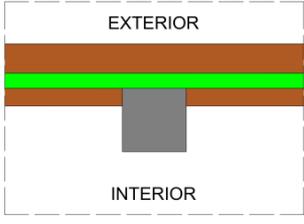
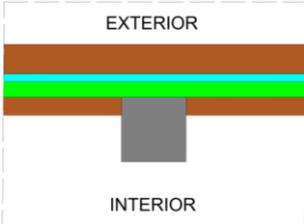
Figura 28. Esquema de las diferentes soluciones constructivas analizadas en función de unas variables determinadas. Fuente: elaboración propia.

3.1.1 INFLUENCIA CÁMARA DE AIRE

CONSIDERANDO LA CONTINUIDAD DEL AISLAMIENTO (GRUPO 1)

Se quiere analizar el efecto que produce ejecutar o no una cámara de aire de 3 cm en el cerramiento, por lo que se analiza la solución con el pilar enrasado al interior y el aislamiento continuo por el exterior en dos situaciones concretas, si todo el espesor del aislante pasa por delante del pilar –relación 1:1– (Figura 29a y Figura 29b). La Tabla 11 muestra los esquemas de las soluciones constructivas, así como las características comunes y diferentes de los mismos.

Tabla 11. Características de las soluciones constructivas comparadas según existencia de cámara de aire considerando la continuidad del aislamiento térmico. Fuente: elaboración propia.

Figura 29. Detalles	Esquema	Características comunes	Características diferentes
A		Solución sin forrado del pilar, pilar interior, con continuidad del aislamiento por el exterior y con el mismo espesor de aislamiento en el pilar que en el resto del cerramiento (Relación cerramiento-pilar = 1).	Sin cámara de aire
B			Con cámara de aire

Los resultados se muestran en la Figura 30 (p. 64) y se puede observar que el disponer o no de cámara de aire en el cerramiento no supone una gran diferencia en la transmitancia térmica lineal, obteniendo un valor de transmitancia de 0,0693 [W/(m·K)] (Figura 30b, p. 64) cuando se ejecuta la cámara y un valor de 0,0724 [W/(m·K)] cuando no se ejecuta (Figura 30a, p. 64), en ambos casos para soluciones con espesores de 10 cm y conductividad de 0,029 [W/(m·K)] en el aislante térmico.

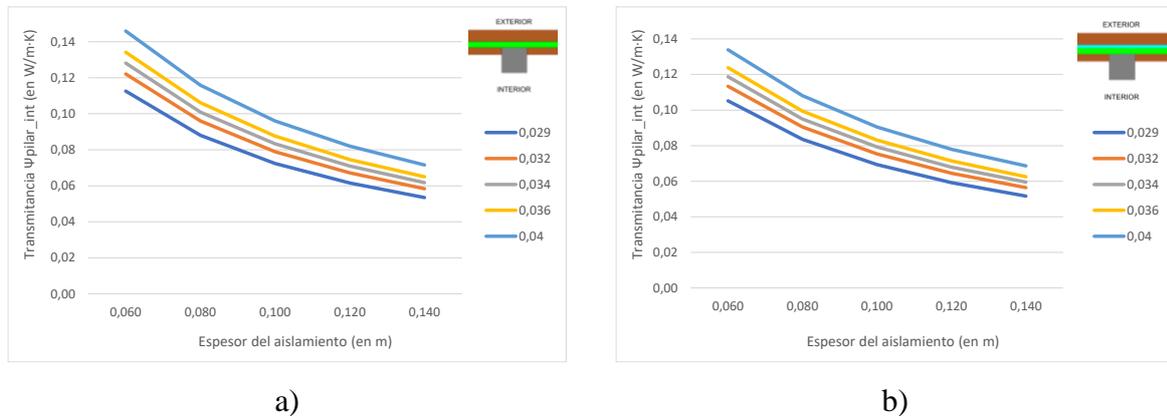


Figura 30. Comportamiento del puente térmico considerando la continuidad del aislamiento térmico, según las características constructivas explicadas en la Tabla 11. Fuente: elaboración propia.

También se advierte que las pendientes de las rectas son más pronunciadas en los dos primeros casos, es decir, cuando el aislante térmico pasa de 6 a 8 cm y cuando pasa de 8 a 10 cm. A partir de los 10 cm de espesor la pendiente se reduce considerablemente, el impacto del incremento del espesor del aislamiento no es tan significativo.

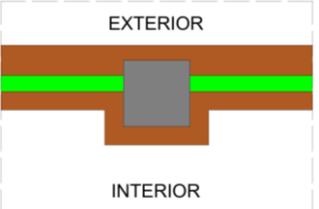
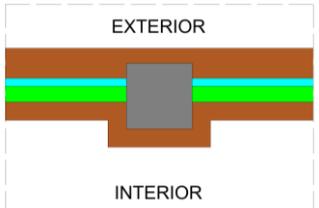
Por ejemplo, para el detalle sin cámara de aire (Figura 30a), fijando la conductividad térmica de 0,029 [W/(m·K)] en el aislante, para un espesor de 6 cm la transmitancia es de 0,1126 [W/(m²·K)], un aumento de espesor a 8 cm la transmitancia se reduce a 0,0880 [W/(m²·K)], lo que supone una reducción de la transmitancia de un 21,85%. Mientras que, con un espesor de aislamiento de 12 cm se obtiene un valor de 0,0615 [W/(m²·K)], aumentando a 14 cm el valor resultante es de 0,0535 [W/(m²·K)], la reducción es de solo un 13%, lo que sigue siendo una reducción grande, pero habría que entrar a valorar otros factores.

El análisis de la ejecución de una cámara de aire de 3 cm permite afirmar que la diferencia que existe entre las soluciones constructivas es pequeña y, por lo tanto, no es una variable determinante, por lo que se propone la no disposición de cámara de aire por facilidad en la ejecución.

CONSIDERANDO LA DISCONTINUIDAD DEL AISLAMIENTO (GRUPO 2)

Al igual que en el caso anterior, debido a que se está trabajando con la tipología de fachada caravista, y suponiendo que no se quiere que los pilares estén enrasados al exterior por temas estéticos, se utiliza como base para comparar otras variables. Estas variables son la disposición de forrado del pilar y la disposición o no de cámara de aire. Hay que destacar que la solución constructiva en la que el pilar está sin forrado no se puede comparar ya que conforme aumenta el espesor del aislante se produce un forrado accidental (Figura 10b y Figura 11b, p. 46). Por lo que las soluciones a comparar para ver el efecto que produce la ejecución o no de una cámara de aire de 3 cm son las que se muestran en la Tabla 12.

Tabla 12. Características de las soluciones constructivas comparadas según la existencia de la cámara de aire considerando la discontinuidad del aislamiento térmico. Fuente: elaboración propia.

Figura 31. Detalles	Esquema	Características comunes	Características diferentes
A		Solución con forrado del pilar, pilar embebido, con la interrupción del aislamiento en el pilar	Sin cámara de aire
B			Con cámara de aire

Los resultados se muestran en la Figura 32 (p. 66) y se puede observar que la transmitancia térmica en el pilar es menor cuando se ejecuta una cámara de aire de 3 cm (Figura 32b, p. 66) con un valor de 0,7028 [W/(m·K)], mientras que sin la cámara el valor obtenido es de 0,7437 [W/(m·K)], en ambos casos para soluciones con espesores de 6 cm y conductividad de 0,029 [W/(m·K)] en el aislante térmico.

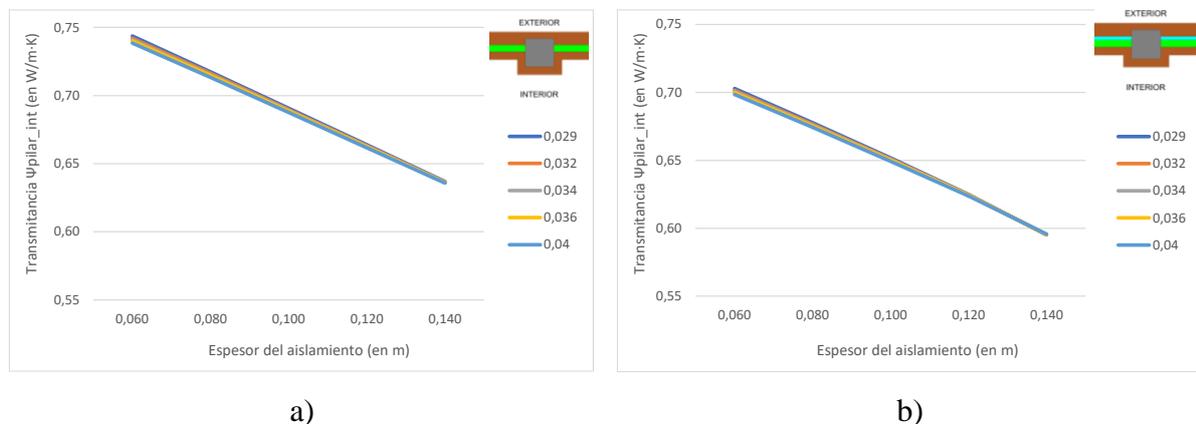


Figura 32. Comportamiento del puente térmico considerando la discontinuidad del aislamiento térmico, según las características constructivas explicadas en la Tabla 12. Fuente: elaboración propia.

Otra cuestión a destacar es que, en todos los casos, la conductividad térmica del aislamiento tiene muy poca influencia ya que no afecta al propio puente térmico. Puede verse que los valores de la transmitancia térmica lineal representados para cada una de las diferentes conductividades son prácticamente coincidentes.

Además, los resultados muestran una pendiente prácticamente constante en todos los espesores de aislamiento térmico. Por lo tanto, en este tipo de soluciones la variable que más peso tiene es el espesor del aislamiento y no la conductividad de este, esto se debe a que el aislante no pasa por el pilar y no afecta al puente térmico.

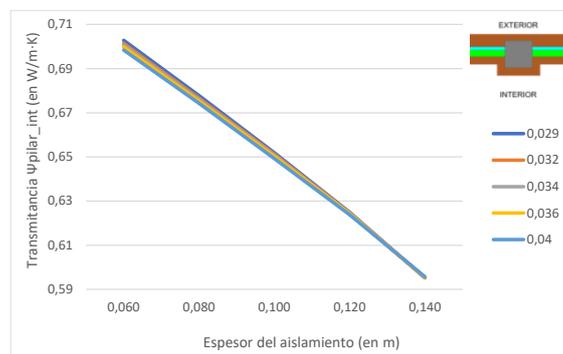


Figura 33. Gráfico Figura 32b a una escala diferente. Fuente: elaboración propia.

Al igual que ocurría con la continuidad del aislamiento, se observa que la ejecución de una cámara de aire de 3 cm no es una variable determinante, por lo que se propone la no disposición de cámara de aire por facilidad en la ejecución.

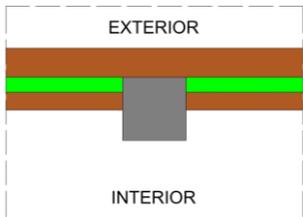
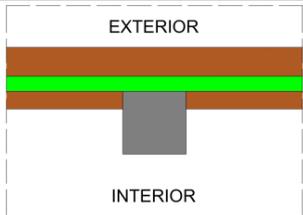
Analizado el efecto que produce la ejecución de la cámara de aire con la continuidad del aislamiento y sin ella, se puede afirmar que la ejecución de esta es más importante cuando no existe la continuidad en el aislamiento. Si comparamos la mejora en el puente térmico, para los casos con continuidad, la mejora del comportamiento es inferior a $0,01 \text{ [W/(m}\cdot\text{K)]}$, al pasar de un valor de puente térmico igual a $0,1126 \text{ [W/(m}\cdot\text{K)]}$ sin cámara de aire, a un valor de $0,1052 \text{ [W/(m}\cdot\text{K)]}$ con la ejecución de la cámara, en ambos casos para soluciones con espesores de 6 cm y conductividad de $0,029 \text{ [W/(m}\cdot\text{K)]}$ en el aislante térmico.

Mientras que, para los casos en los que no existe continuidad este salto es mayor, en concreto, la mejora supone un salto superior a $0,04 \text{ [W/(m}\cdot\text{K)]}$ al pasar de un valor de puente térmico igual a $0,7437 \text{ [W/(m}\cdot\text{K)]}$ sin cámara de aire, a un valor de $0,7028 \text{ [W/(m}\cdot\text{K)]}$ con la ejecución de la cámara, en ambos casos para soluciones con espesores de 6 cm y conductividad de $0,029 \text{ [W/(m}\cdot\text{K)]}$ en el aislante térmico.

3.1.2 INFLUENCIA CONTINUIDAD DEL AISLAMIENTO

En este apartado se busca analizar cómo influye en el puente térmico la continuidad del aislante. Para ello se analiza el puente térmico en el pilar cuando el aislamiento se interrumpe (Figura 34a) y cuando el aislante es continuo, considerando que el espesor del aislante que forra el pilar tiene el mismo espesor que el del cerramiento –relación 1:1– (Figura 34b).

Tabla 13. Características de las soluciones constructivas comparadas según continuidad del aislamiento. Fuente: elaboración propia.

Figura 34. Detalles	Esquema	Características comunes	Características diferentes
A		Solución pilar interior, sin forrado del pilar y sin cámara de aire.	Discontinuidad en el aislamiento
B			Continuidad en el aislamiento

Las pérdidas energéticas que se producen cuando el aislamiento no es continuo son muy importantes (Figura 35a, p. 69), en cambio cuando el aislamiento es continuo (Figura 35b) las pérdidas se minimizan de forma considerable. Si se observa la Figura 35a (p. 69) para un espesor de aislamiento de 6 cm y conductividad térmica de 0,029 [W/(m·K)], al producirse la discontinuidad el valor de la transmitancia térmica lineal es de 0,7480 [W/(m·K)], mientras que en la Figura 35b (p. 69), al tener continuidad el aislante con el mismo espesor y continuidad el valor de la transmitancia es de 0,1126 [W/(m·K)]. Lo que implica una reducción del puente térmico de un 85%, lo que supone una mejora importante en el comportamiento térmico y, como consecuencia, un ahorro importante de energía.

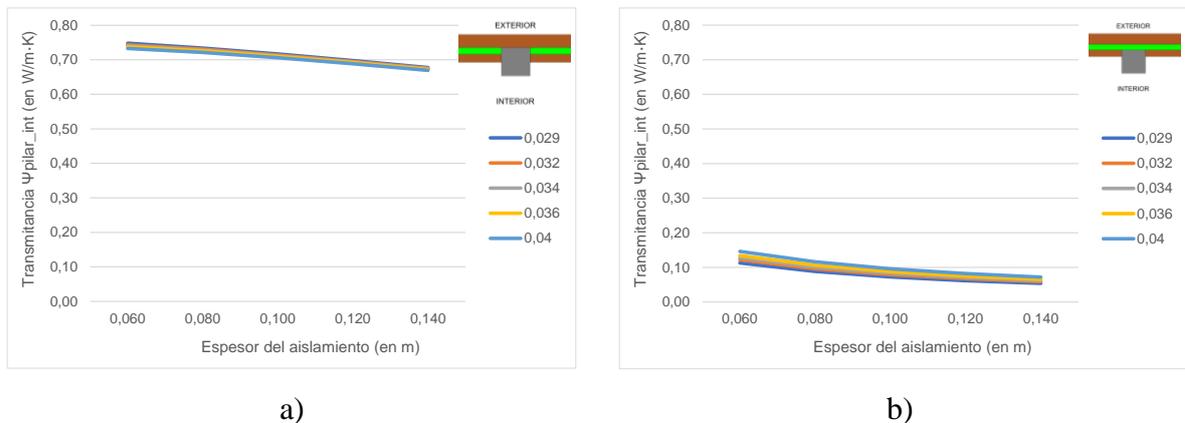


Figura 35. Comportamiento del puente térmico considerando la continuidad del aislamiento térmico, según las características constructivas explicadas en la Tabla 13. Fuente: elaboración propia.

Como ya se ha visto en el apartado anterior y como se puede ver en la Figura 35a cuando se produce una discontinuidad en el aislamiento los resultados muestran una pendiente prácticamente constante en todos los espesores de aislamiento térmico. Por lo tanto, en este tipo de soluciones la variable que más peso tiene es el espesor del aislamiento y no la conductividad de este. Lo que implica que cuanto mayor sea el espesor del aislamiento en el cerramiento mejor será el comportamiento del puente térmico, independientemente de la conductividad que tenga el aislamiento.

Lo que se puede observar en la Figura 35a, se confirma con los datos obtenidos sobre las diferentes conductividades, para espesores de 6 cm, se obtiene un valor de 0,7480 y 0,7342 [$W/(m \cdot K)$] para conductividades 0,029 y 0,032 [$W/(m \cdot K)$] respectivamente, por lo que resulta una diferencia mínima.

3.1.3 INFLUENCIA RELACIÓN AISLAMIENTO DEL CERRAMIENTO Y EN EL PUENTE TÉRMICO PARA UNA CONTINUIDAD EXTERIOR DEL AISLAMIENTO

Una vez se ha comprobado que el puente térmico se minimiza si el aislamiento es continuo, lo siguiente que se busca analizar es la influencia de la relación entre el espesor del aislamiento térmico existente en el cerramiento y en el pilar.

Cuando el aislamiento térmico es continuo por delante del pilar existen dos situaciones posibles: a) el espesor del aislante del pilar es la mitad que el del cerramiento –relación 0,5:1– (Figura 36a); y b) el espesor del aislante que forra el pilar es de la misma dimensión que el del cerramiento –relación 1:1– (Figura 36b).

Tabla 14. Características de las soluciones constructivas comparadas según relación en el aislamiento para una solución constructiva con aislamiento exterior. Fuente: elaboración propia.

Figura 36. Detalles	Esquema	Características comunes	Características diferentes
A		Solución pilar interior, sin forrado del pilar y sin cámara de aire.	Relación 0,5 (continuidad de la mitad del aislamiento en el pilar)
B			Relación 1 (continuidad de la totalidad del aislamiento en el pilar)

Los resultados se muestran en la Figura 37 (p. 71), donde se pueden observar dos gráficos con comportamientos similares, pero con valores de transmitancia térmica lineal más pequeños para la relación de aislamiento 1:1. El resultado es el esperado, a mayor espesor de aislamiento en el pilar mejor se comporta, es decir, se produce una mayor reducción de las pérdidas energéticas en el pilar.

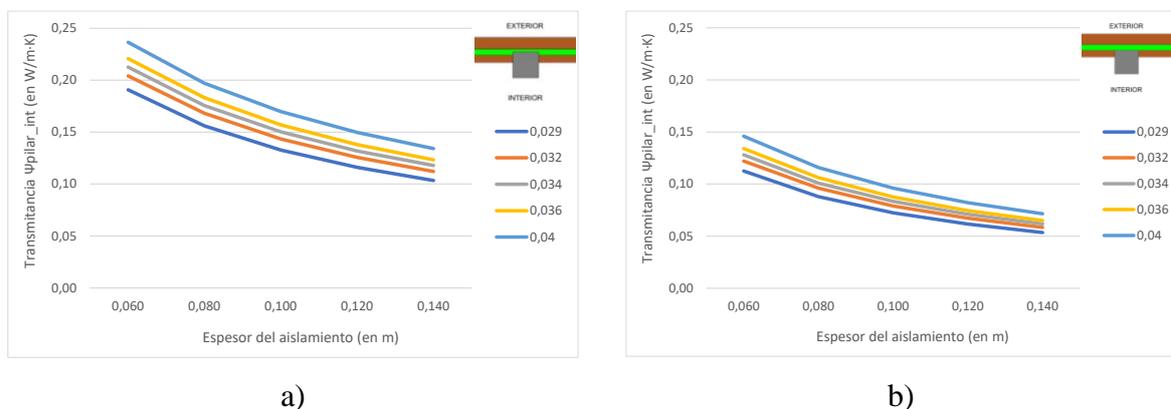


Figura 37. Comportamiento del puente térmico considerando la relación del aislamiento térmico, según las características constructivas explicadas en la Tabla 14. Fuente: elaboración propia.

También se observa que las pendientes de las rectas son más pronunciadas en los dos primeros casos, cuando se pasa de 6 a 8 cm y de 8 a 10 cm. En el resto de los casos se atenúa esa pendiente, lo que significa que el aumento del espesor es significativo en el valor de la transmitancia térmica lineal para todos los casos, pero en especial para los dos primeros.

Se aprecia una marcada diferencia entre las diferentes conductividades térmicas para los espesores más pequeños, mientras que conforme se aumenta el espesor se observa una reducción en esa diferencia. Por ejemplo, si se comparan los resultados de la Figura 37b para espesores de 6 cm, los valores de transmitancias oscilan entre 0,1126 [W/(m·K)] y 0,1459 [W/(m·K)], mientras que si se comparan espesores de 14 cm el rango de valores es mucho menor, obteniendo valores que están entre 0,0535 [W/(m·K)] y 0,0715 [W/(m·K)].

El espesor del aislamiento que pasa por delante del pilar resulta ser una variable relevante, sin llegar a tener la importancia que tiene la continuidad del aislamiento. Se trata de un porcentaje de mejora en torno al 40% si la continuidad que se produce en el aislamiento es del 100% del espesor que existe en el cerramiento.

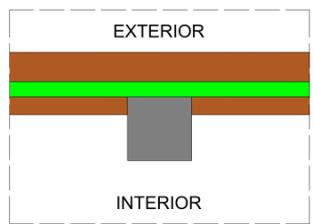
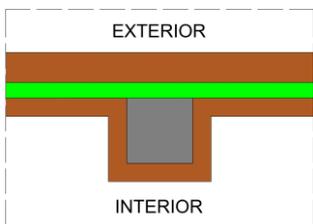
3.1.4 INFLUENCIA FORRADO DEL PILAR PARA CONTINUIDAD EXTERIOR DEL AISLAMIENTO

Una vez realizada la comparación anterior, en este apartado se busca analizar cómo influye para este mismo caso el forrado del pilar en el valor del puente térmico.

Cuando la solución constructiva por la que se opta es pasar el aislamiento por el exterior del pilar, existe la posibilidad de dejar sin forrar el pilar dándole únicamente un revestimiento interior con yeso (Figura 38a) o se puede forrar el pilar con el ladrillo del trasdosado cerámico (Figura 38b). La Tabla 15 recoge las soluciones que se van a utilizar para evaluar la influencia del forrado del pilar en el puente térmico.

De las dos soluciones comparadas en este apartado, la primera de ellas (Figura 38a) podría provocar la aparición de fisuras entre el pilar y la hoja principal, mientras que la segunda (Figura 38b) es como indica la norma que se tiene que hacer para evitar la transmisión de ruidos por vibración a la estructura, y para evitar la formación de fisuras.

Tabla 15. Características de las soluciones constructivas comparadas según forrado del pilar considerando la continuidad del aislamiento. Fuente: elaboración propia.

Figura 38. Detalles	Esquema	Características comunes	Características diferentes
A		Solución sin cámara de aire, pilar interior, con continuidad del aislamiento por el exterior y con el mismo espesor de aislamiento en el pilar que en el resto del cerramiento (Relación cerramiento-pilar = 1).	Sin forrado de pilar
B			Con forrado de pilar

La Figura 39 (p. 73) muestra que la solución constructiva que mejores resultados ofrece es la que no tiene el forrado del pilar, con unos valores de transmitancia lineal que oscilan entre 0,1126 y 0,0535 [W/(m·K)] frente a valores de entre 0,1577 y 0,0775 [W/(m·K)] en ambos casos para soluciones con conductividad 0,029 de aislante térmico. Esto se debe a que la dimensión del puente térmico es menor cuando no se forra el pilar.

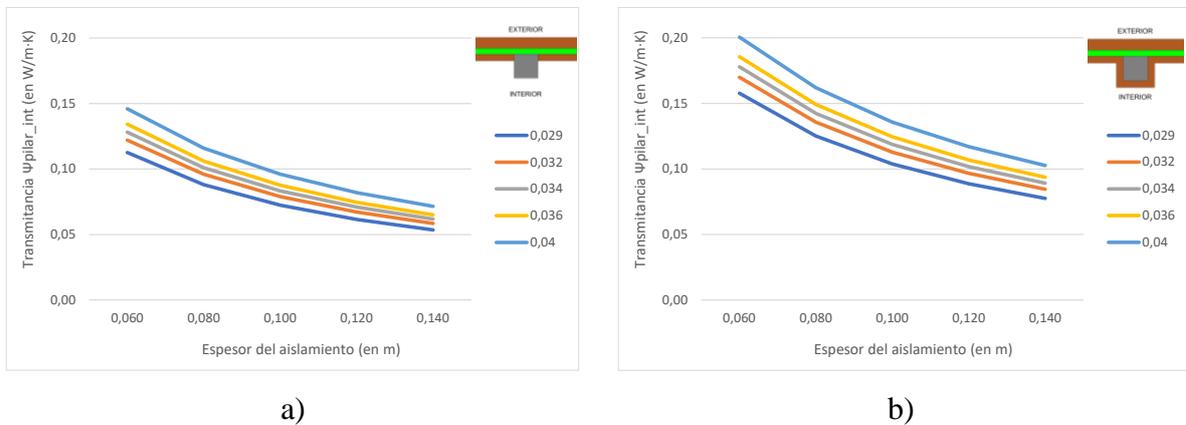


Figura 39. Comportamiento del puente térmico considerando la relación del aislamiento térmico, según las características constructivas explicadas en la Tabla 15. Fuente: elaboración propia.

Esta diferencia de transmitancias térmicas lineales se debe a que cuando no existe el forrado del pilar (Figura 40a) la longitud del puente térmico es igual a la dimensión del pilar más el revestimiento de yeso que se aplica sobre el pilar (28 cm, Figura 40a), lo que genera un valor de puente térmico de $0,1126 \text{ [W/(m}\cdot\text{K)]}$ para un espesor de 6 cm y conductividad térmica de $0,029 \text{ [W/(m}\cdot\text{K)]}$. En cambio, con las mismas características técnicas del aislamiento térmico, pero con la existencia del forrado del pilar (Figura 40b), el trasdosado sobresale del ancho del cerramiento lo que genera una longitud de puente térmico mayor (42 cm, Figura 40b). y un valor de transmitancia térmica lineal de $0,1577 \text{ [W/(m}\cdot\text{K)]}$.

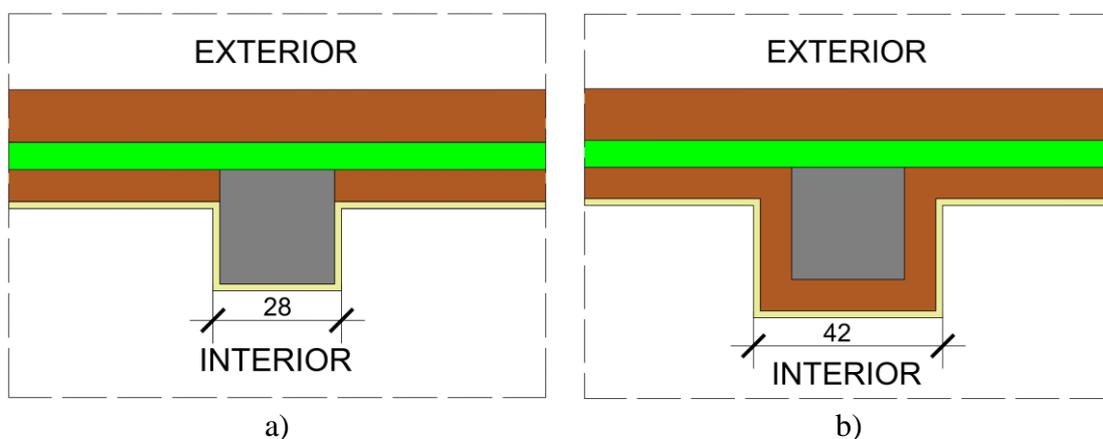


Figura 40. Dimensión del puente térmico según la solución constructiva. Fuente: elaboración propia.

También se advierte que las pendientes de las rectas son más pronunciadas en los dos primeros casos, es decir, cuando el aislante térmico pasa de 6 a 8 cm y cuando pasa de 8 a 10 cm. A partir de los 10 cm de espesor la pendiente se reduce considerablemente, el impacto del incremento del espesor del aislamiento no es tan significativo.

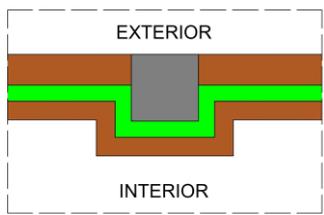
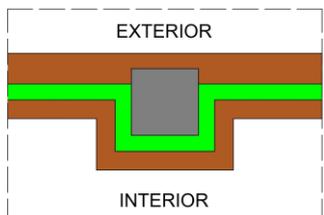
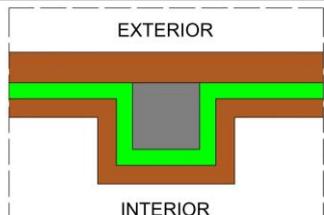
Se puede observar la marcada diferencia que hay entre las diferentes conductividades, siendo la conductividad de 0,029 [W/(m·K)] en el aislante térmico la que mejor se comporta, frente a la de 0,040 [W/(m·K)] que es la que peor comportamiento tiene.

Se puede concluir que la solución que mejor comportamiento presenta es en la que no se ejecuta el forrado del pilar, pero se debe tener en cuenta que, en algunos casos, bien sea por ruido, fisuras u otros condicionantes, la ejecución de este forrado no se va a poder evitar.

3.1.5 INFLUENCIA POSICIÓN DEL PILAR PARA UNA CONTINUIDAD INTERIOR EN EL AISLAMIENTO

Para una continuidad exterior del aislamiento la única posición del pilar es interior (Figura 36d, p. 70 y Figura 38, p. 72), mientras que si se pasa el aislamiento térmico por la cara interior del pilar las posiciones que puede adoptar son: a) enrasado por el exterior (Figura 41a); b) embebido en la hoja principal (Figura 41b); y c) enrasado por el interior (Figura 41c). En la Tabla 16 se recogen los esquemas, las características que son comunes y las que son diferentes de estas soluciones.

Tabla 16. Características de las soluciones constructivas comparadas según posición del pilar considerando la continuidad interior del aislamiento. Fuente: elaboración propia.

Figura 41. Detalles	Esquema	Características comunes	Características diferentes
A			Pilar exterior y aislamiento por el interior
B		Solución con forrado de pilar, sin cámara de aire y con el mismo espesor de aislamiento en el pilar que en el resto del cerramiento (Relación cerramiento-pilar = 1).	Pilar embebido y aislamiento por el interior
C			Pilar interior y aislamiento por el interior

El primer análisis busca determinar si existe algún patrón entre la variable transmitancia térmica del pilar (Ψ_{pilar}) y el espesor del aislamiento en función de las diferentes posiciones del pilar (Figura 42, p. 76). Independientemente de la posición del pilar, se observa que existe una correlación negativa entre las variables, es decir, a medida que aumenta el espesor del aislante la transmitancia del puente térmico disminuye.

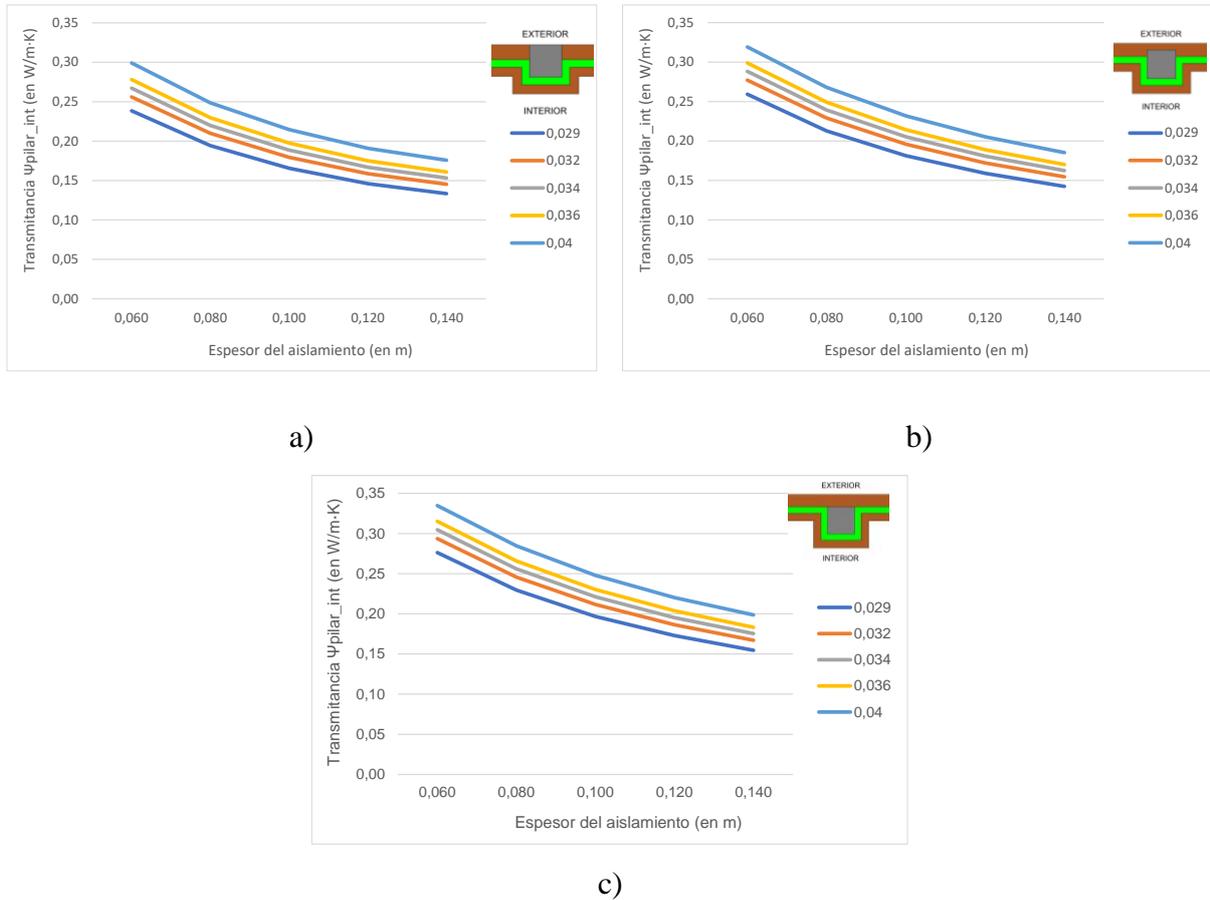


Figura 42. Comportamiento del puente térmico considerando la continuidad del aislamiento térmico, según las características constructivas explicadas en la Tabla 16 . Fuente: elaboración propia.

Observando las Figura 42a, Figura 42b y Figura 42c se puede apreciar que la transmitancia térmica lineal es menor cuando el pilar está enrasado al exterior, con un valor de 0,2383 [W/(m·K)], mientras que enrasando el pilar a la cara interior de la hoja principal de la fachada el valor obtenido es de 0,2763 [W/(m·K)], en ambos casos para soluciones con espesores de 6 cm y conductividad de 0,029 [W/(m·K)] en el aislante térmico. Habría que estudiar si esta solución es viable para la tipología de fachada caravista, ya que se vería el pilar por el exterior de la fachada.

Se puede concluir que a mayor recorrido de aislante térmico para recubrir el pilar se obtienen peores transmitancias térmicas del puente térmico. Entre las soluciones de pilar embebido o enrasado por el interior, parece que no hay una gran diferencia, por lo que pasar 1/2 de ladrillo por delante del pilar puede ser una alternativa viable, siendo mejor pasar el ladrillo completo por delante del pilar.

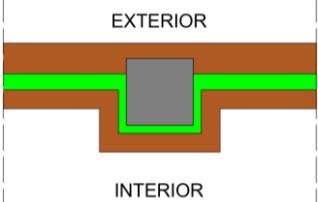
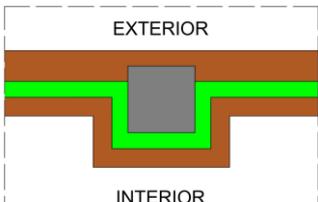
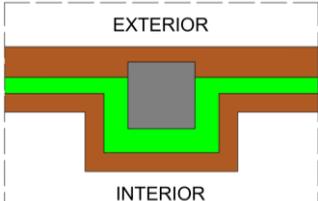
3.1.6 INFLUENCIA RELACIÓN AISLAMIENTO DEL CERRAMIENTO Y EN EL PUENTE TÉRMICO PARA UNA CONTINUIDAD INTERIOR DEL AISLAMIENTO

En este apartado se busca analizar cómo influye en el puente térmico la relación de espesor del aislamiento existente en el cerramiento y en el pilar.

Debido a que se está trabajando con la tipología de fachada caravista, y suponiendo que no se pretende que los pilares estén enrasados al exterior por temas estéticos, se utiliza como base para comparar otras variables la solución constructiva en la que el pilar está embebido, algo muy habitual en esta tipología constructiva.

La continuidad del aislamiento se produce siempre y cuando no se corte el aislamiento, pero esta continuidad en el puente térmico puede tener diferente espesor a la del cerramiento (Figura 43, p. 78). Por este motivo se van a comparar soluciones con diferentes continuidades de aislamiento: a) el espesor del aislante del pilar es la mitad que el del cerramiento –relación 0,5:1– (Figura 43a, p. 78); b) el espesor del aislante que forra el pilar es de la misma dimensión que el del cerramiento –relación 1:1– (Figura 43b, p. 78) y c) el espesor del aislante del pilar es mayor que el del cerramiento –relación 1,5:1– (Figura 43c, p. 78). En la Tabla 17 (p. 78) se muestran los esquemas de las soluciones constructivas que se van a analizar con una descripción de las características comunes y las diferencias existentes entre ellas.

Tabla 17. Características de las soluciones constructivas comparadas según la existencia de la cámara de aire considerando la discontinuidad del aislamiento térmico. Fuente: elaboración propia.

Figura 43. Detalles	Esquema	Características comunes	Características diferentes
A		Solución pilar embebido, con forrado del pilar y sin cámara de aire.	Relación 0,5 (continuidad de la mitad del aislamiento en el pilar)
B			Relación 1 (continuidad de la totalidad del aislamiento en el pilar)
C			Relación 1,5 (continuidad en el pilar de 1,5 veces el espesor del aislamiento en el cerramiento)

Los resultados se muestran en la Figura 44 (p. 79) y se puede observar que la relación de aislamiento que existe en el pilar es una variable muy influyente en el valor de transmitancia térmica lineal, a más espesor de aislamiento en el puente térmico, mejor comportamiento térmico de la solución constructiva. Esto se observa en la Figura 44 (p. 79) porque los tres gráficos tienen la misma escala y se puede observar como las líneas se desplazan hacia la parte inferior del gráfico conforme se aumenta el espesor en el pilar.

En la Figura 44a (p. 79) se observan pendientes mucho más pronunciadas que en la Figura 44b y Figura 44c (p. 79), esto quiere decir que el impacto del espesor para la relación 0,5 de aislamiento es mucho mayor que para las otras dos relaciones de aislamiento.

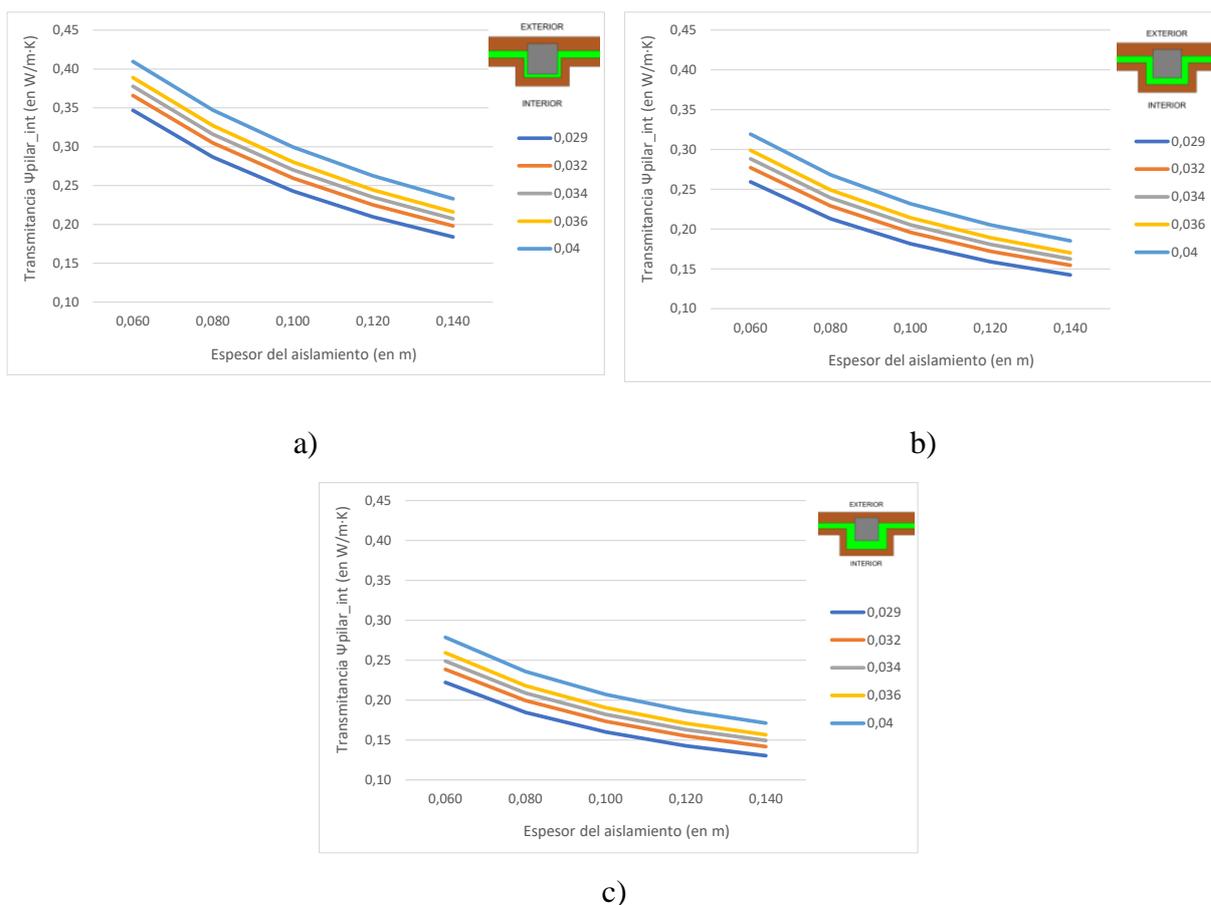


Figura 44. Comportamiento del puente térmico considerando la relación entre el aislamiento en el cerramiento y el pilar, según las características constructivas explicadas en la Tabla 17. Fuente: elaboración propia.

Los resultados muestran lo esperado, una disminución importante en la transmitancia térmica del pilar conforme se va aumentando el espesor del aislamiento existente en el pilar, obteniendo un valor de $0,3469 [\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})]$ para una continuidad de la mitad del aislamiento (Figura 44a), reduciéndose a un valor de $0,2594 [\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})]$ para una continuidad completa del aislamiento (Figura 44b), pudiendo llegar hasta un valor de $0,2222 [\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})]$ si el espesor que pasa por el pilar es 1,5 veces el que hay en el cerramiento (Figura 44c), considerando ambos casos para soluciones con espesores de 6 cm y conductividad de $0,029 [\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})]$ en el aislante térmico.

Considerando un espesor de 6 cm y una relación de 1:1 en el aislamiento, se produce un aumento de pérdidas energéticas entre el 28-34% al colocar solo la mitad del aislamiento en el pilar. En el caso de poner 1,5 veces más aislante en el pilar se produce una reducción de pérdidas energéticas del 13-14%.

Mientras que, considerando un espesor de 14 cm y una relación de 1:1 en el aislamiento, el aumento que se produce en las pérdidas energéticas está entre el 26-29% al darle continuidad solo con la mitad del aislamiento en el pilar. Si la relación del aislamiento se aumenta a 1,5 veces el espesor en el pilar se produce una disminución en las pérdidas energéticas del 7-8%.

Todos estos porcentajes se obtienen de los valores de puentes térmicos aportados en la Tabla 18.

Tabla 18. Valor de la transmitancia térmica lineal obtenida en función de la relación entre el aislamiento en el cerramiento y el aislamiento en el pilar. Fuente: elaboración propia.

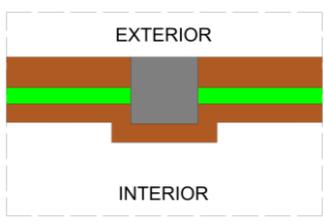
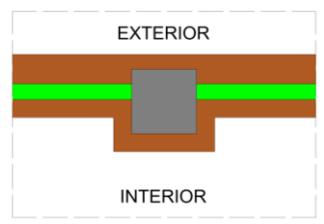
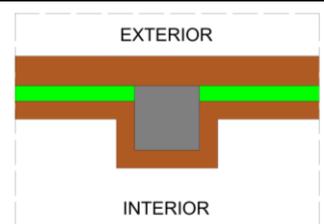
Características		Transmitancia térmica lineal [W/(m·K)]		
Espesor (cm)	Conductividad [W/(m·K)]	Relación 0,5	Relación 1	Relación 1,5
6	0,029	0,3469	0,2594	0,2222
6	0,040	0,4096	0,3193	0,2787
14	0,029	0,1839	0,1424	0,1303
14	0,040	0,2330	0,1853	0,1712

Se concluye que la continuidad de todo el espesor del aislamiento en el puente térmico supone una mejora relevante en el puente térmico, mientras que el aumento de ese espesor a una relación de 1,5 veces el espesor supone una mejora, pero no tan relevante.

3.1.7 INFLUENCIA POSICIÓN DEL PILAR PARA UNA DISCONTINUIDAD EN EL AISLAMIENTO

Las posiciones que puede adoptar el pilar en caso de que el aislamiento interrumpa su continuidad son: a) enrasado al exterior (Figura 45a); b) embebido en el cerramiento (Figura 45b); y c) enrasado al interior (Figura 45c). En la Tabla 19 se recogen los esquemas, las características que son comunes y las que son diferentes de estas soluciones.

Tabla 19. Características de las soluciones constructivas comparadas según la posición del pilar considerando la discontinuidad del aislamiento Fuente: elaboración propia.

Figura 45. Detalles	Esquema	Características comunes	Características diferentes
A		Solución con forrado de pilar, sin cámara de aire y con la interrupción del aislamiento en el pilar	Pilar exterior
B			Pilar embebido
C			Pilar interior

Se busca determinar si existe algún patrón entre la variable transmitancia térmica del pilar (Ψ_{pilar}) y el espesor del aislamiento en función de las diferentes posiciones del pilar (Figura 46, p. 82). Independientemente de la posición del pilar, se observa que existe una correlación negativa entre las variables, es decir, a medida que aumenta el espesor del aislante la transmitancia disminuye (Figura 46, p. 82).

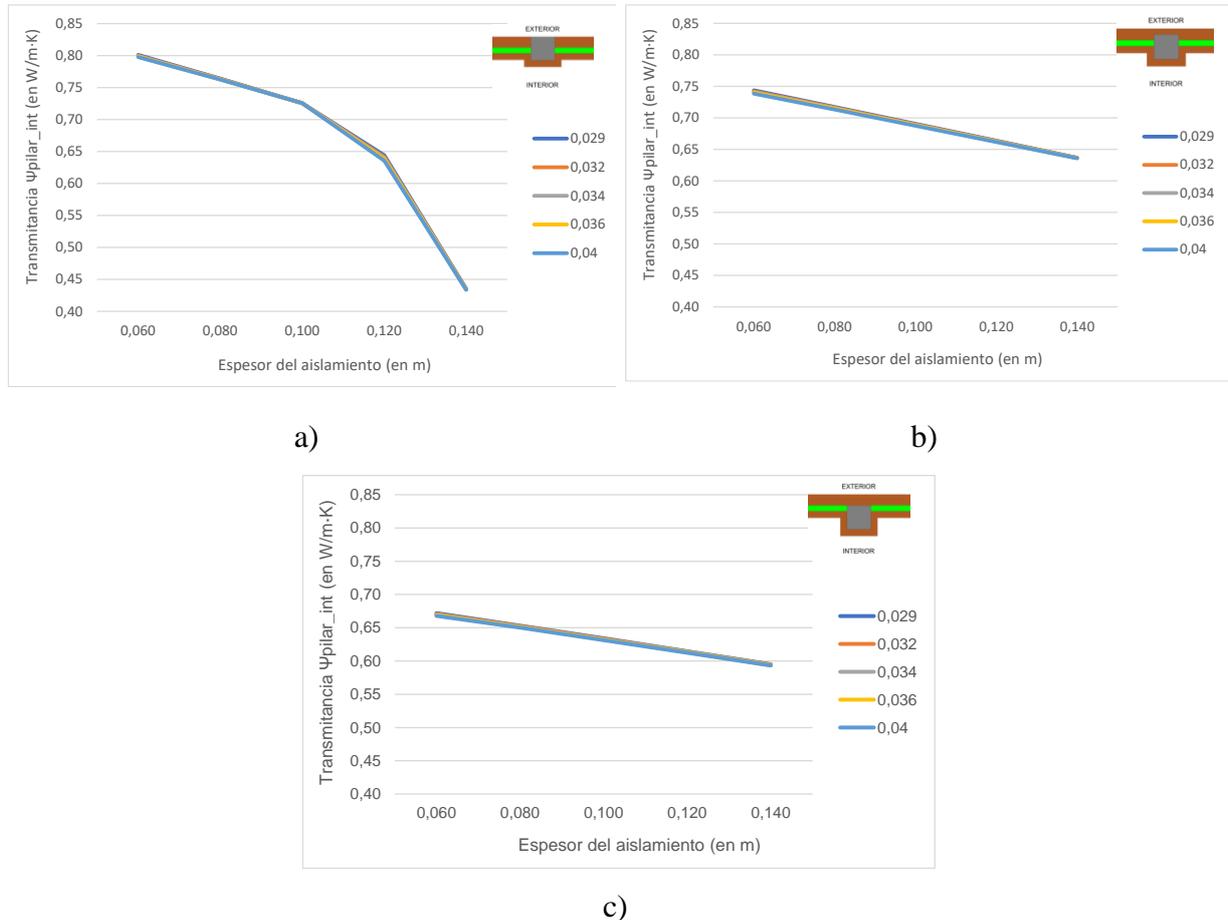


Figura 46. Comportamiento del puente térmico considerando la discontinuidad del aislamiento, según las características constructivas explicadas en la Tabla 19. Fuente: elaboración propia.

Si se comparan los resultados obtenidos en función del pilar (Figura 46a, Figura 46b y Figura 46c) se observa que cuando el pilar está embebido o enrasado por el interior el gráfico entre las variables existe una relación lineal. En cambio, si el pilar está enrasado por el exterior la relación es logarítmica. Lo que implica que existan diferencias significativas en los resultados, en especial cuando el espesor de aislamiento es ≥ 12 cm.

En estos casos se reduce la transmitancia térmica lineal de forma notable, es decir, el puente térmico es menor cuando el pilar se sitúa por el exterior (Figura 46a). Esto se debe a que con aislantes con espesores ≥ 12 cm junto con el espesor del cerramiento se iguala o se supera la dimensión del pilar (25 cm) de forma que el trasdosado de ladrillo de la hoja interior pasa completamente por delante de la cara interior del pilar (Figura 47b, p. 83) o incluso el aislamiento (Figura 47c, p. 83), lo que genera que la longitud del puente térmico

sea igual a la dimensión del pilar (25 cm) y las transmitancias térmicas lineales sean de 0,6440 [W/(m·K)] y 0,4354 [W/(m·K)] respectivamente para espesores de 12 cm y 14 cm y conductividad térmica de 0,029 [W/(m·K)]. En cambio, con espesores de aislamiento menores de 12 cm el trasdosado del pilar sobresale del ancho del cerramiento lo que genera una longitud de puente térmico mayor (42 cm). y un valor de transmitancia térmica lineal de 0,8011 [W/(m·K)] para un espesor de 6 cm.

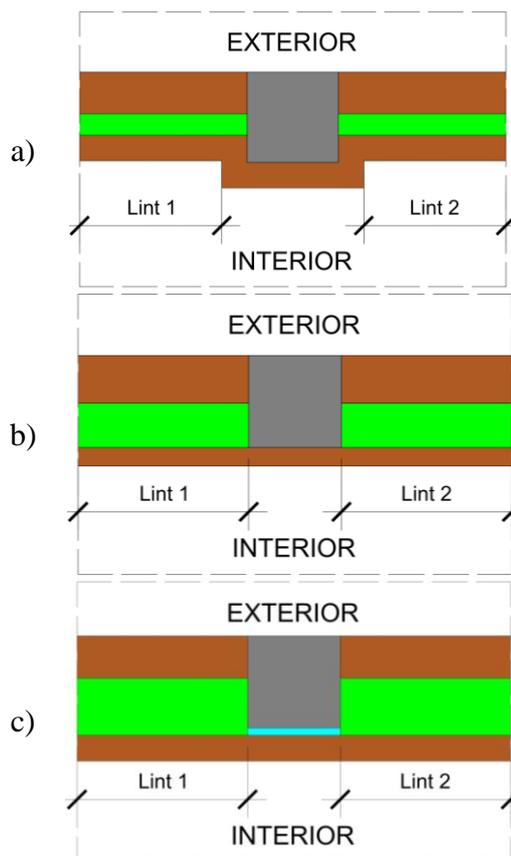


Figura 47. Disposición de la composición del cerramiento en función de los espesores del aislante térmico. Casos: a) 6 cm; b) 12 cm y c) 14 cm. Fuente: elaboración propia.

También se puede observar en los gráficos (Figura 46, p. 82), para los tres casos, que la conductividad térmica del aislamiento no es una variable muy influyente, puesto que las líneas que representan cada una de las diferentes transmitancias son prácticamente coincidentes o se solapan. La Figura 46b (p. 82) se realiza cambiando la escala para poder visualizar mejor lo que se ha comentado (ejemplo: la línea amarilla se corresponde con la conductividad de 0,036 [W/(m·K)]).

El hecho de que la conductividad del aislante no influya en la transmitancia térmica, pone de manifiesto que en este tipo de soluciones lo más relevante es el espesor del aislante térmico, ya que no se está incidiendo de forma directa en el propio puente térmico.

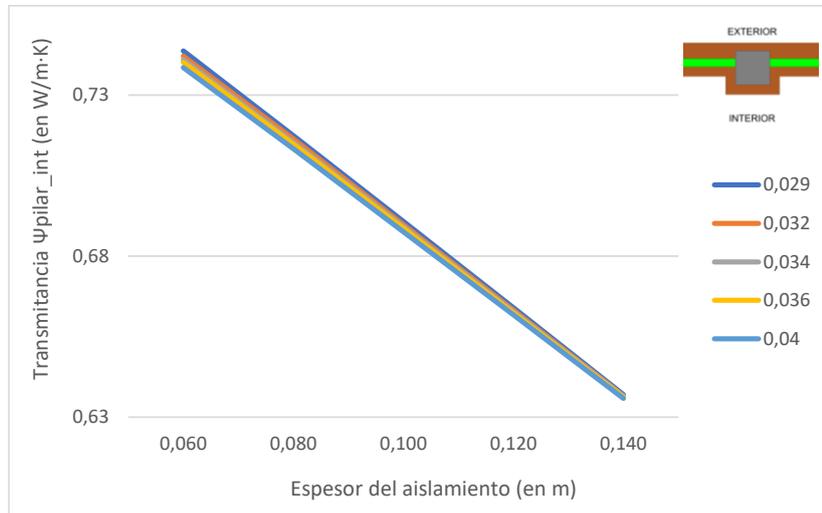


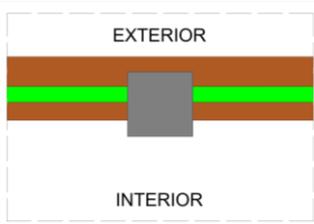
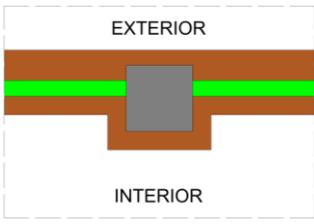
Figura 48. Gráfico Figura 46b a una escala diferente. Fuente: elaboración propia.

Por tanto, la diferencia en el gráfico de la Figura 46a se debe a las diferencias del ancho del puente térmico y a que la propia solución se ve modificada al aumentar el aislamiento.

3.1.8 INFLUENCIA FORRADO DEL PILAR PARA UNA DISCONTINUIDAD EN EL AISLAMIENTO

Como ya se ha comentado antes, debido a que se está trabajando con la tipología de fachada caravista, y suponiendo que no se pretende que los pilares estén enrasados al exterior por temas estéticos, se utiliza como base para comparar otras variables la solución constructiva en la que el pilar está embebido, las soluciones que están en la Tabla 20 son las que se van a utilizar para evaluar la influencia que tiene forrar el pilar.

Tabla 20. Características de las soluciones constructivas comparadas según forrado del pilar considerando la discontinuidad del aislamiento. Fuente: elaboración propia.

Figura 49. Detalles	Esquema	Características comunes	Características diferentes
A		Solución sin cámara de aire, pilar embebido, con la interrupción del aislamiento en el pilar	Sin forrado de pilar
B			Con forrado de pilar

La Figura 50 (p. 86) muestra que la solución constructiva que mejores resultados ofrece es la que tiene el forrado del pilar, al contrario que pasaba cuando se producía la continuidad del aislamiento, con unos valores de transmitancia lineal que oscilan entre 0,7437 y 0,7385 [W/(m·K)] frente a valores de entre 0,8697 y 0,8528 [W/(m·K)] en ambos casos para soluciones de 6 cm de aislante térmico y con diferentes conductividades (0,029 a 0,040 [W/(m·K)]). Esto se debe a que al forrarse el pilar con un trasdoso cerámico se mejora la transmitancia térmica y compensa con el incremento de longitud del puente térmico.

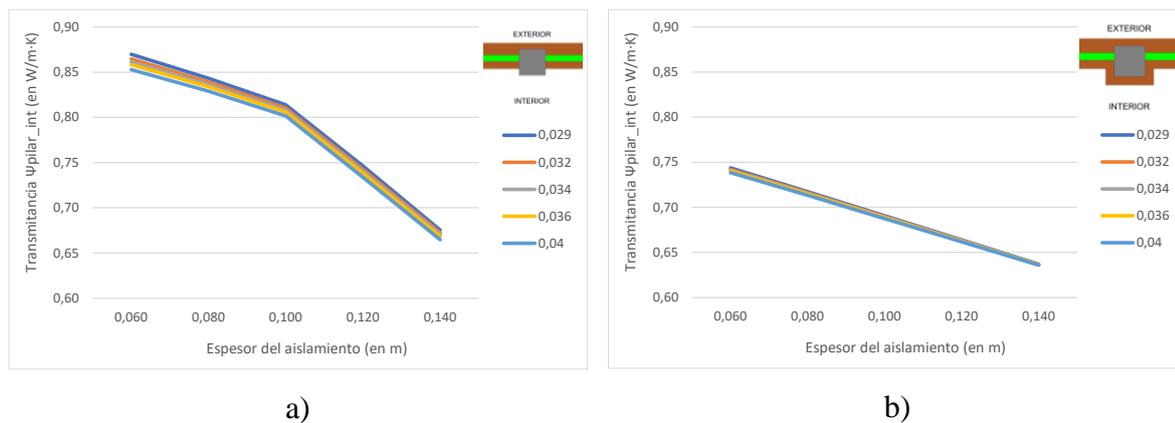


Figura 50. Comportamiento del puente térmico considerando la discontinuidad del aislamiento, según las características constructivas explicadas en la Tabla 20. Fuente: elaboración propia.

En la Figura 50a se observa una pendiente muy pronunciada en el aumento de espesor de 10 cm en adelante, esto se debe a que el espesor del cerramiento supera en dimensión al pilar, y el ladrillo de la hoja interior pasa completamente por delante de la cara interior del pilar (Figura 47, p. 83), es a partir de estos espesores que el valor de la transmitancia se iguala entre las dos soluciones constructivas, al producirse el forrado accidental del pilar.

Si se comparan los resultados para todos los espesores estudiados, se puede observar que la transmitancia térmica en el pilar es menor si existe el forrado del pilar (Figura 50b), obteniéndose un valor de $0,7437 [W/(m \cdot K)]$, mientras que si no existe forrado (Figura 50a) el valor que se obtiene es de $0,8697 [W/(m \cdot K)]$, ambos para espesor de 6 cm y conductividad térmica de $0,029 [W/(m \cdot K)]$.

Es cierto que existe una reducción en la diferencia de valores obtenidos a partir de 10 cm de espesor, debido a que el espesor del aislamiento hace que la dimensión del cerramiento sea mayor a la del pilar y hace que el revestimiento de yeso pasa continuo por la cara exterior del pilar o incluso parte del ladrillo del trasdosado, sin suponer un aumento de longitud de puente térmico (Figura 51, p. 87). Pese a esta reducción, no se consigue un comportamiento igual o mejor que con la solución constructiva en la que existe el forrado del pilar con ladrillo cerámico.

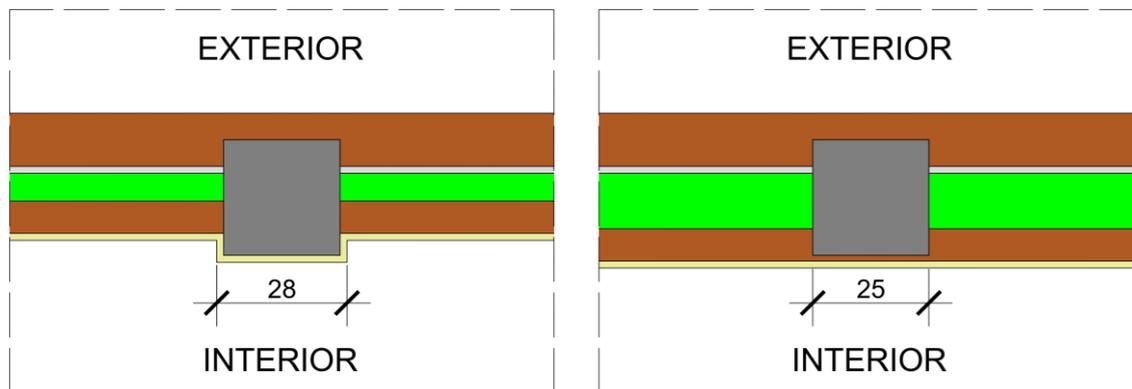


Figura 51. Longitud del puente térmico en función de los espesores del aislamiento térmico. Casos: a) 6 cm; b) 12 cm. Fuente: elaboración propia.

Igual que pasaba en casos comparados anteriormente, se puede observar en estos gráficos que la transmitancia térmica del aislante en el cerramiento no es una variable muy influyente, puesto que la línea que representa cada una de las diferentes transmitancias son prácticamente coincidentes visualmente.

Como ya se ha comentado anteriormente, un hecho que se puede observar para todas las soluciones constructivas con discontinuidad en el aislamiento es que la conductividad térmica del aislamiento no es una variable muy influyente, al contrario que pasa con el espesor, las líneas muestran una pendiente constante, lo que implica que aumentar el espesor lo máximo posible permitido sería la mejor opción.

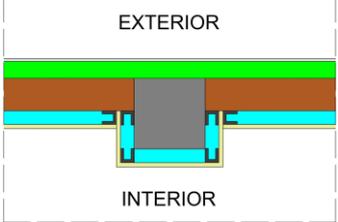
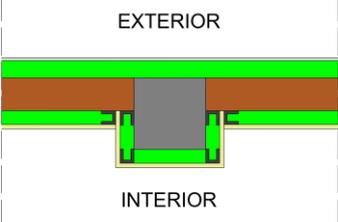
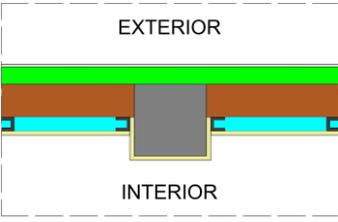
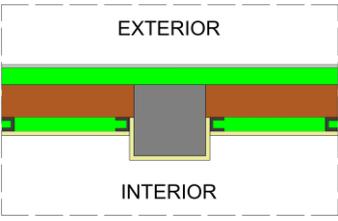
3.2 FACHADA SATE

Para la tipología de fachadas SATE se analizan dos variables, la primera es el forrado del pilar y la segunda es el tipo de trasdosado, buscando las características constructivas más favorables para obtener un valor de transmitancia térmica lineal menor. La variable tipo de trasdosado adopta diferentes soluciones constructivas: a) sin trasdosado (Figura 52a); b) sólo en el pilar con ladrillo cerámico hueco de 7 cm de espesor (Figura 52b); c) en el cerramiento y en el pilar se realiza un trasdosado autoportante con placa de yeso laminado y sin aislamiento térmico en su interior (Figura 52c); d) en el cerramiento y en el pilar se realiza un trasdosado autoportante con placa de yeso laminado y con aislamiento térmico en su interior (Figura 52d); e) en el cerramiento un trasdosado autoportante con placa de yeso laminado y sin aislamiento térmico en su interior, en el pilar un revestimiento continuo de yeso (Figura 52e); y f) en el cerramiento un trasdosado autoportante con placa de yeso laminado y con aislamiento térmico en su interior, en el pilar un revestimiento continuo de yeso (Figura 52f). En la Tabla 21 se recogen los esquemas y las características de cada solución.

Para todas las soluciones con placa de yeso laminado se utilizan canales de 48 mm y montantes de 46 mm de acero galvanizado dispuestos cada 40 cm.

Tabla 21. Características de las soluciones constructivas de fachada SATE. Fuente: elaboración propia.

Figura 52. Detalles	Esquema	Características
A		Hoja principal de ladrillo cerámico perforado sin forrado del pilar
B		Hoja principal de ladrillo cerámico perforado y forrado del pilar con ladrillo hueco doble

Figura 52. Detalles	Esquema	Características
C		Hoja principal de ladrillo cerámico perforado con trasdosado de PYL con cámara de aire y con forrado del pilar
D		Hoja principal de ladrillo cerámico perforado con trasdosado de PYL con aislamiento y con forrado del pilar
E		Hoja principal de ladrillo cerámico perforado con trasdosado de PYL con cámara de aire y sin forrado del pilar
F		Hoja principal de ladrillo cerámico perforado con trasdosado de PYL con aislamiento y sin forrado del pilar

La Figura 53 (p. 90) muestra los resultados obtenidos y se observa que en las soluciones donde no se realiza un trasdosado en el cerramiento (Figura 53a y Figura 53b, p. 90) el comportamiento del puente térmico es más desfavorable en la opción b) ya que al realizar un trasdosado por el interior del pilar con ladrillo (Figura 53b, p. 90) se incrementa la longitud del puente térmico.

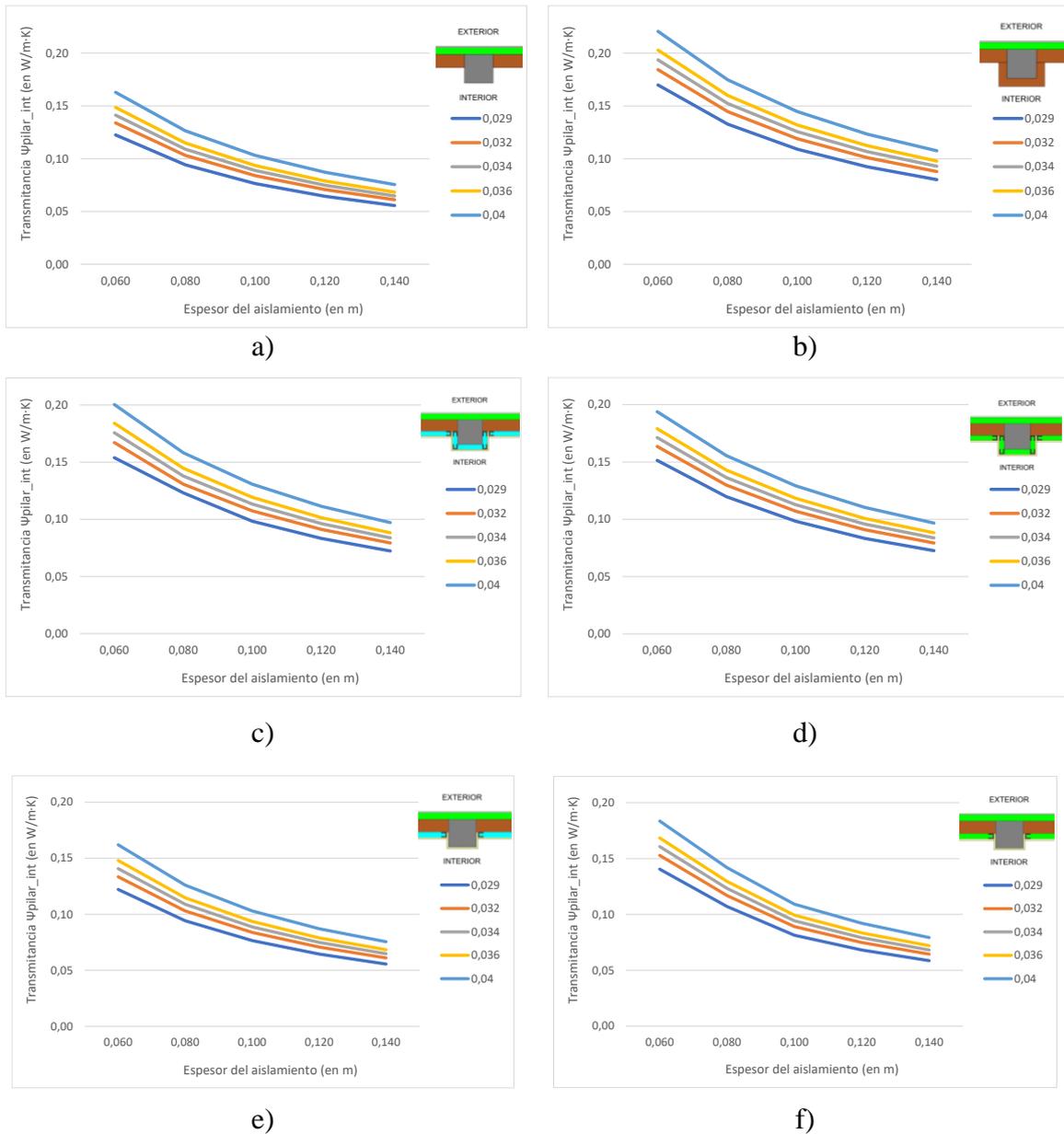


Figura 53. Comportamiento del puente térmico fachada SATE. Fuente: elaboración propia.

En el resto de las opciones donde se trasdosa el cerramiento con trasdosados autoportante de placa de yeso laminado, se van a realizar diferentes análisis.

El primero, en función de si se coloca (Figura 53f) o no (Figura 53e) aislamiento en el trasdosado, y sin trasdosar el pilar. Se observa que para estas soluciones (considerando un espesor de aislamiento térmico de 6 cm y una conductividad de 0,029 [W/(m·K)]) la transmitancia térmica en el pilar es menor cuando se deja la cámara de aire en el trasdosado (Figura 53e) con un valor de 0,1222 [W/(m·K)] que cuando se rellena el trasdosado con aislamiento (Figura 53f) el valor asciende a 0,1406 [W/(m·K)].

Esto se debe a que al colocar el aislamiento en el trasdosado (sin intervenir en el pilar) lo que se está haciendo es mejorar la U del cerramiento, impidiendo la fuga de calor a través del cerramiento, y obligando a que esta fuga de calor se produzca por el puente térmico, produciendo unas mayores pérdidas energéticas en el pilar. Mientras que, si no se coloca aislamiento en el trasdosado, la U del cerramiento es peor y se produce una mayor pérdida de energía por el cerramiento, sin forzar a que la fuga se produzca por el pilar, obteniendo así unas pérdidas energéticas menores por el puente térmico, no significando que las pérdidas no se produzcan por otros puntos del cerramiento.

En el segundo caso, las soluciones con trasdosado de PYL sin aislante en el cerramiento y con (Figura 53c, p. 90) o sin trasdosado (Figura 53e, p. 90) en el pilar, se observa que forrar el pilar con el trasdosado supone una pérdida energética de 0,1539 [W/(m·K)], mientras que aplicar un revestimiento de yeso reduce el valor a 0,1222 [W/(m·K)]. Esto se debe, principalmente, a que las medidas del ancho del puente térmico son diferentes.

Por último, visto que con la existencia de trasdosado de PYL, lo mejor es no poner aislamiento en los montantes y no forrar el pilar (Figura 53e, p. 90), lo último que se quiere comparar son los valores obtenidos para esta solución con los de la solución sin trasdosado (Figura 53a, p. 90). Considerando espesores de 6 cm y conductividad de 0,029 [W/(m·K)] en el aislante térmico, si se evita el trasdosado (Figura 53a, p. 90) el valor obtenido es de 0,1225 [W/(m·K)], mientras que con el trasdosado el valor es similar, 0,1222 [W/(m·K)]. Ambas soluciones muestran resultados similares, por lo que habría que entrar a valorar otros aspectos para la elección de la solución constructiva, como son el paso de las diferentes instalaciones, el confort térmico y acústico en el interior, entre otros.

4 DISCUSIÓN

4.1 COMPARATIVA VALORES CTE

Este TFG busca analizar el comportamiento del puente térmico en los pilares integrados en fachada y comparar los valores de transmitancia térmica lineal obtenidos por procedimientos detallados con los proporcionados por el Código Técnico de la Edificación en el DA-DB-HE-3 (Ministerio de Fomento, 2014) obtenidos por procedimientos simplificados. Por lo que se plantea las hipótesis 1 y 2.

La primera de ellas es la siguiente:

“El método simplificado no va a ser equivalente al método detallado, por lo que los valores dados por el atlas de puentes térmicos no van a ser coincidentes con los obtenidos en este trabajo”

Esta hipótesis se confirma, ya que se realiza una comparativa entre los valores proporcionados por el DA-DB-HE-3 (Ministerio de Fomento, 2014), obtenidos por métodos simplificados, y los valores obtenidos en este trabajo por métodos detallados de los puentes térmicos. La Tabla 22 (p. 94) compara los valores del grupo 1 (aislamiento continuo), mientras que en la Tabla 23 (p. 95) se hace la comparativa del grupo 2 (aislamiento discontinuo) donde se observa que los valores obtenidos son diferentes, para el caso de estudio con una dimensión de pilar de 25x25 cm, no pudiendo extrapolar a pilares de mayores dimensiones.

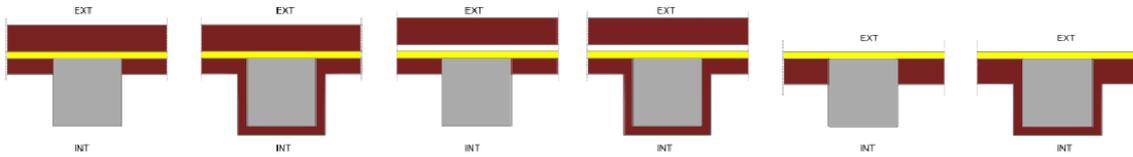
Debido a que se han obtenido diferentes valores de transmitancia térmica lineal (Ψ_i) para una misma transmitancia térmica del cerramiento (U_{muro}), en la Tabla 22 (p. 94) y Tabla 23 (p. 95) se proporciona el valor máximo y mínimo obtenido.

Tabla 22. Comparativa valores de transmitancia térmica lineal del Grupo 1 obtenidos por métodos simplificados por el DA-DB-HE-3 y los obtenidos por métodos detallados. Fuente: elaboración propia a partir de los valores proporcionados por DA-DB-HE-3.

Grupo	Umuro [W/(m ² ·K)]	DA-DB-HE 3 Ψi [W/(m·K)]	TFG Ψi [W/(m·K)]	
			Menor valor obtenido	Mayor valor obtenido
Grupo 1. Aislamiento continuo	0,7300	0,0200	-	-
	0,4694	0,0110	0,1459	0,4183
	0,4400	0,0100	-	-
	0,4353	0,0096	0,1342	0,3999
	0,4340	0,0095	0,1339	0,3936
	0,4175	0,0083	0,1281	0,3898
	0,4048	0,0073	0,1238	0,3758
	0,3991	0,0069	0,1220	0,3791
	0,3893	0,0061	0,1188	0,3663
	0,3733	0,0049	0,1134	0,3560
	0,3704	0,0046	0,1126	0,3617
	0,3481	0,0029	0,1052	0,3393
	0,3100	0,0000	-	-
	0,2700	0,0000	-	-
	0,2400	0,0000	-	-

Grupo 1: Pilares integrados en fachada con continuidad del aislamiento de fachada

Aislamiento continuo por el exterior del pilar



Aislamiento continuo por el interior

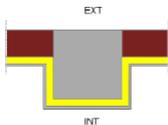
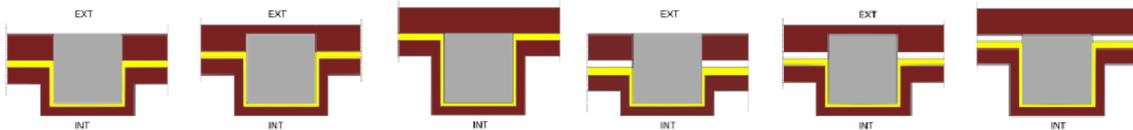
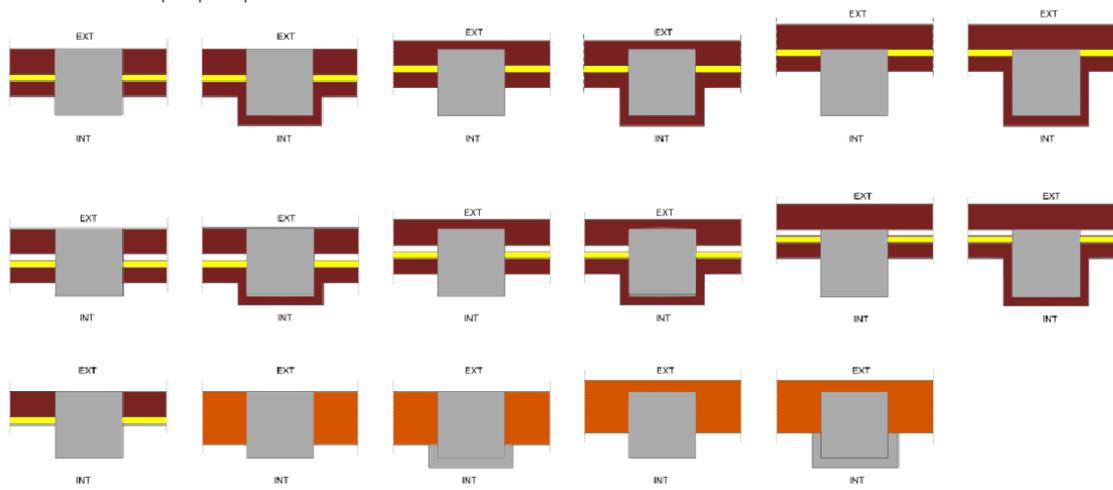


Tabla 23. Comparativa valores de transmitancia térmica lineal Grupo 2 obtenidos por métodos simplificados por el DA-DB-HE-3 y los obtenidos por métodos detallados. Fuente: elaboración propia a partir de los valores proporcionados por DA-DB-HE-3.

Grupo	Umuro [W/(m ² ·K)]	DA-DB-HE 3 Ψi [W/(m·K)]	TFG Ψi [W/(m·K)]	
			Menor valor obtenido	Mayor valor obtenido
Grupo 2. Aislamiento discontinuo	0,7300	1,0300	-	-
	0,4694	1,0480	0,6680	0,9118
	0,4400	1,0500	-	-
	0,4353	1,0482	0,6691	0,9179
	0,4340	1,0477	0,6433	0,8054
	0,4175	1,0413	0,6698	0,9212
	0,4048	1,0365	0,6445	0,8103
	0,3991	1,0343	0,6706	0,9247
	0,3893	1,0305	0,6454	0,8131
	0,3733	1,0243	0,6462	0,8159
	0,3704	1,0232	0,6719	0,9303
	0,3481	1,0147	0,6475	0,8204
	0,3100	1,0000	-	-
	0,2700	0,9700	-	-
	0,2400	0,9400	-	-

Grupo 2: Pilares integrados en fachada sin continuidad del aislamiento de fachada

Aislamiento interrumpido por el pilar



En ambos casos se han comprobado únicamente los valores obtenidos para espesores de aislamiento de 6 cm, esa comprobación se considera suficiente para poder afirmar que no son coincidentes los del método simplificado con los del detallado.

La segunda hipótesis planteada fue la siguiente:

“Los valores aportados por el atlas van a estar infravalorados”

Esta hipótesis se confirma para las soluciones constructivas donde el aislamiento es continuo (Grupo 1). En la Tabla 22 (p. 94) se puede observar que existe una diferencia considerable, por ejemplo, para el caso de Umuro igual a $0,4694 \text{ [W/(m}^2 \cdot \text{K)]}$, el valor proporcionado por el DA-DB-HE-3 de $0,0110 \text{ [W/(m} \cdot \text{K)]}$ supone un 2,63% del valor obtenido por métodos detallados que es de $0,4183 \text{ [W/(m} \cdot \text{K)]}$, lo que se traduce en un error del 97,37%.

Al mismo tiempo, esta hipótesis se rechaza para las soluciones donde el aislamiento es discontinuo (Grupo 2). En la Tabla 23 (p. 95) se puede observar que existe una diferencia no tan considerable, por ejemplo, para el caso de Umuro igual a $0,4694 \text{ [W/(m}^2 \cdot \text{K)]}$, el valor proporcionado por el DA-DB-HE-3 de $1,0480 \text{ [W/(m} \cdot \text{K)]}$ supone el 156,89% del valor obtenido por métodos detallados que es de $0,6680 \text{ [W/(m} \cdot \text{K)]}$.

Analizados los resultados se observa que los valores proporcionados para las soluciones constructivas con la continuidad del aislamiento están infravalorados en la tabla del DA-DB-HE-3, mientras que los valores proporcionados para soluciones con discontinuidad en el aislamiento están sobredimensionados. Por lo que la hipótesis planteada no se puede confirmar para ambos grupos.

La norma UNE-EN ISO 14683 (AENOR, 2020) menciona los diferentes métodos disponibles para el cálculo de la transferencia de calor global y de la precisión esperada de cada uno de ellos, en concreto para los catálogos de puentes térmico considera una precisión típica de $\pm 20\%$, lo que se ha demostrado que no se cumple para el caso del atlas de puentes térmicos proporcionado por el DA-DB-HE-3. Además, es la propia norma la que en su apartado “6.6 Catálogos de puentes térmicos” afirma que los ejemplos que figuran en un catálogo no coinciden con los valores reales, y el añadido que aporta este trabajo es que aparte de no coincidir, el porcentaje de error es muy superior al esperado.

Cabe resaltar que los valores del atlas de puentes térmicos que se han analizado están introducidos como valores por defecto en los programas de certificación energética que proporciona el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, son programas aceptados por el Gobierno de España, estos programas son la Herramienta

unificada LIDER-CALENER (HULC), CYPETHERM HE Plus, CE3, CE3X, CERMA, SG SAVE y TeKton3D TK-CEEP. Programas de certificación energética que están utilizando valores que no son reales y con poca precisión. En el caso de estar sobredimensionados, como pasa con los que tienen aislamiento discontinuo, no supone un problema tan importante como que esos valores estén infradimensionados, ya que se están produciendo unas pérdidas en el edificio de las que nadie es consciente debido a que se consideran valores mucho inferiores a los reales.

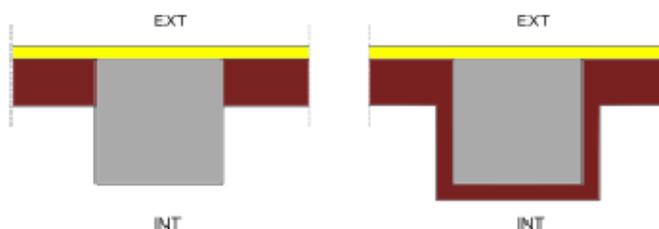
La tabla de valores proporcionada por el DA-DB-HE-3 (Ministerio de Fomento, 2014) es la misma para soluciones constructivas de fachada tradicional con continuidad en el aislamiento y con SATE. En la Tabla 24 se comparan algunos de los valores obtenidos de tipología SATE en este TFG con los proporcionados por la tabla del documento de apoyo.

Tabla 24. Comparativa valores de transmitancia térmica lineal de SATE, Grupo 1, obtenidos por métodos simplificados por el DA-DB-HE-3 y los obtenidos por métodos detallados. Fuente: elaboración propia a partir de los valores proporcionados por DA-DB-HE-3.

Grupo	Umuro [W/(m ² ·K)]	DA-DB-HE 3 Ψi [W/(m·K)]	TFG Ψi [W/(m·K)]	
			Menor valor obtenido	Mayor valor obtenido
Grupo 1. Aislamiento continuo	0,7300	0,0200	-	-
	0,5168	0,0126	0,1629	0,2207
	0,4546	0,0105	0,1413	0,1937
	0,4400	0,0100	-	-
	0,3994	0,0069	0,1225	0,1699
	0,3764	0,0051	0,1148	0,1599
	0,3311	0,0016	0,1528	0,1635
	0,3100	0,0000	-	-
	0,2700	0,0000	-	-
	0,2523	0,0000	0,0749	0,1068
	0,2400	0,0000	-	-
	0,2010	0,0000	0,0611	0,0793
	0,1674	0,0000	0,0586	0,0726

Grupo 1: Pilares integrados en fachada con continuidad del aislamiento de fachada

Aislamiento continuo por el exterior del pilar



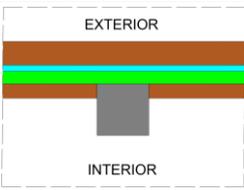
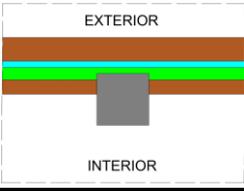
En la Tabla 22 (p. 94) ya se ha visto que el porcentaje de error en fachadas tradicionales con aislamiento continuo (Grupo 1) es de prácticamente del 98%. Si se comparan los valores proporcionados por el DA-DB-HE-3 para el Grupo 1 con los obtenidos en la tipología de fachada SATE, también se observan discrepancias entorno al 92% según los datos de la Tabla 24.

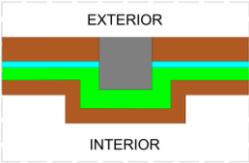
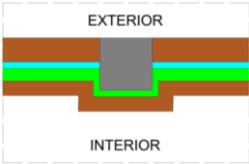
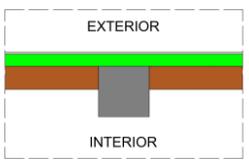
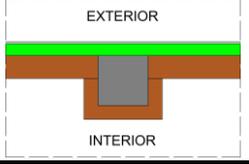
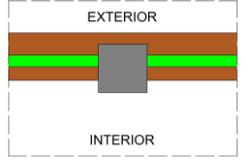
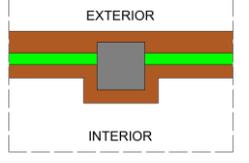
Visto que no coinciden se piensa que el problema principal de estos errores es la clasificación que hace el propio atlas, únicamente divide en 2 grupos, considerando igual una solución de fachada tradicional con una SATE, una solución pasando todo el aislamiento que una solución donde solo pasa la mitad del aislamiento por delante del pilar.

Otro problema que se observa es que se proporcionan los valores en función de la transmitancia del muro (U_{muro}) y se ha podido demostrar que para un mismo valor de U se obtienen diferentes valores de la transmitancia térmica lineal en el pilar (Ψ) en función del espesor y conductividad térmica del aislante. Por lo que se cree que lo mejor es proporcionar el valor de transmitancia según la solución constructiva que se vaya a diseñar en el proyecto y ejecutar en obra.

Según los resultados obtenidos se propone una clasificación diferente, formada por cuatro grupos (Tabla 25) y cuya justificación se proporciona en el Anexo 2. Justificación grupos puentes térmicos.

Tabla 25. Cuadro resumen de la clasificación planteada para los puentes térmicos de pilares integrados en fachada. Fuente: elaboración propia.

Grupo A	Grupo A1		Solución con aislamiento que pasa por el exterior con relación 1 en el aislamiento
	Grupo A2		Solución con aislamiento que pasa por el exterior con relación 0,5 en el aislamiento

Grupo B	Grupo B1		Solución con aislamiento que pasa por el interior con relación 1 o superior en el aislamiento
	Grupo B2		Solución con aislamiento que pasa por el interior con relación 0,5 en el aislamiento
Grupo C	Grupo C1		Solución SATE sin forrado
	Grupo C2		Solución SATE con forrado
Grupo D	Grupo D1		Solución con aislamiento discontinuo sin forrado del pilar
	Grupo D2		Solución con aislamiento discontinuo con forrado del pilar

En la Tabla 26 se recogen las diferentes hipótesis planteadas en relación con la comparativa de valores del CTE y la conclusión de estas.

Tabla 26. Resumen hipótesis comparativa valores CTE. Fuente: elaboración propia.

NÚM.	HIPÓTESIS COMPARATIVA VALORES CTE	CONFIRMA / RECHAZA
1	El método simplificado no va a ser equivalente al método detallado, por lo que los valores dados por el atlas de puentes térmicos no van a ser coincidentes con los obtenidos en este trabajo	SE CONFIRMA
2	Los valores aportados por el atlas van a estar infravalorados	SE CONFIRMA (Grupo 1)
		SE RECHAZA (Grupo 2)

4.2 FACHADA DE LADRILLO CARAVISTA

Con respecto al análisis de las fachadas de ladrillo caravista se examinan las variables que son determinantes en el cálculo de la transmitancia térmica lineal de un puente térmico, por lo que se plantean las hipótesis 3, 4, 5, 6, 7 y 8.

La tercera hipótesis propone que:

“El forrado del pilar reduce el puente térmico.”

Esta hipótesis se confirma para las soluciones constructivas donde el aislamiento es discontinuo (Grupo 2) y el forrado del pilar influye positivamente en el comportamiento térmico.

Al mismo tiempo, esta hipótesis se rechaza para las soluciones constructivas donde el aislamiento es continuo (Grupo 1) ya que al forrar el pilar se incrementa la longitud del puente térmico (Figura 54) lo que ocasiona que se reduzcan las distancias a los planos de corte y el valor del área del cerramiento conforme a la Ecuación 3 (p. 51), lo que conlleva al aumento del valor de la transmitancia térmica lineal.

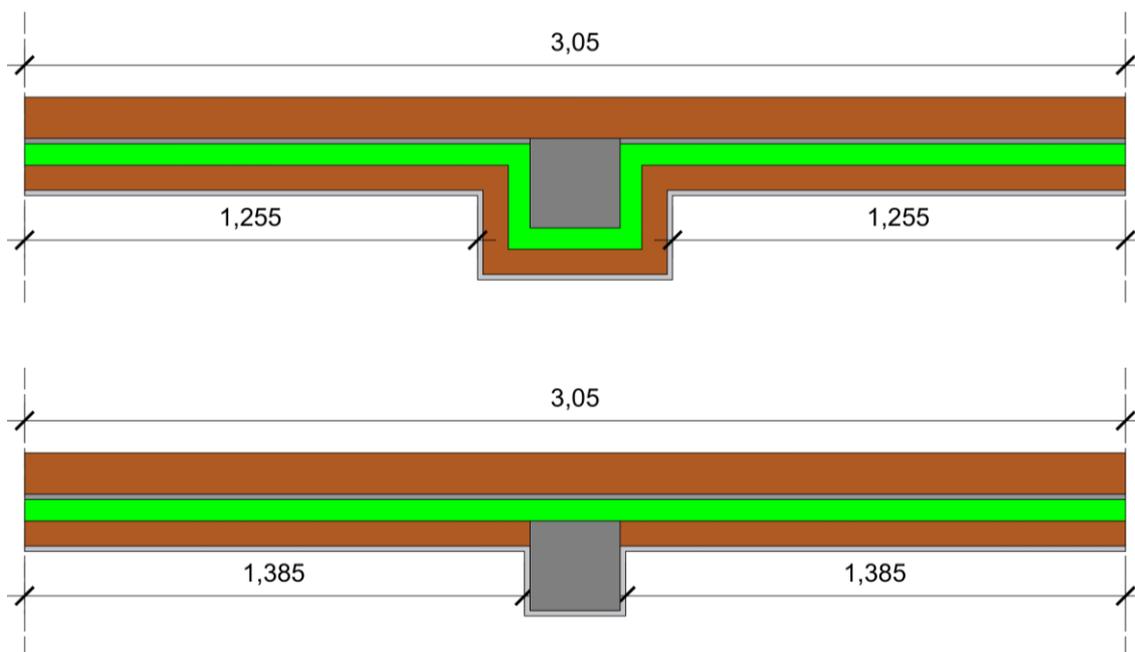


Figura 54. Influencia del forrado en las distancias a los planos de corte y como consecuencia en el valor de la transmitancia térmica lineal. Fuente: elaboración propia.

La cuarta hipótesis planteada relacionada con esta tipología de fachada es:

“La continuidad del aislamiento térmico en el pilar implica una reducción considerable en el puente térmico.”

Esta hipótesis se confirma, los resultados muestran que el puente térmico disminuye considerablemente (Figura 55). Tomando como base el puente térmico que se genera en las soluciones constructivas donde el aislante se interrumpe se ha observado que cuando se pasa por delante del pilar tan solo la mitad del espesor del aislamiento que existe en el cerramiento el puente térmico se reduce un 58,44 %, si se pasa por delante del pilar el mismo espesor de aislamiento que conforma el cerramiento, se reduce un 68,56% con respecto a la solución inicial con discontinuidad, y si el espesor de aislamiento que pasa es 1,5 veces el que se encuentra en el cerramiento, se produce una mejora del 75,47% respecto de la solución con discontinuidad.

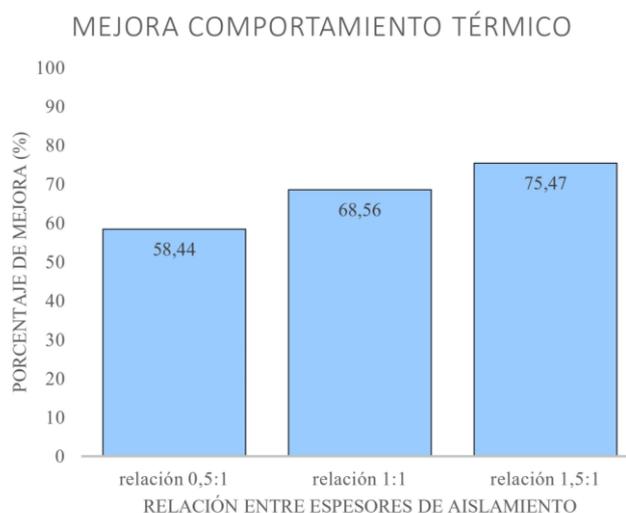


Figura 55. Gráfico que muestra el porcentaje de mejora del comportamiento térmico de las diferentes soluciones constructivas en función de la relación del aislamiento. Fuente: elaboración propia.

Para obtener estos datos se comparan los resultados obtenidos para las soluciones constructivas explicadas en la Tabla 27, se cogen los resultados para espesor 8 cm y conductividad térmica de 0,032 [W/(m·K)] en el aislante térmico, con ello se ha elaborado la Tabla 28 en la que se muestra el porcentaje de mejora que supone darle continuidad al aislamiento en el pilar.

Tabla 27. Características constructivas que se utilizan para evaluar la mejora del comportamiento térmico. Fuente: elaboración propia.

Características constructivas	Esquema solución
<p>Pilar embebido, con cámara de aire y con forrado del pilar.</p> <p>Variando la relación de espesor en el aislamiento existente en el pilar.</p>	

Tabla 28. Mejora transmitancia térmica lineal en función del espesor del aislamiento en el encuentro con el pilar. Fuente: elaboración propia.

Espesor cerramiento (cm)	Relación espesor	Espesor pilar (cm)	Valor ψ_i [W/(m·K)]	Mejora
8	0	0	0,6766	-
8	0,5	4	0,2812	58,44 %
8	1	8	0,2127	68,56%
8	1,5	12	0,1866	75,47%

Vistos los números de transmitancia térmica lineal, es indiscutible que ejecutar una solución constructiva pasando la mitad del aislamiento es aconsejable con respecto a la ejecución de una solución en la que el aislamiento se vea interrumpido en el pilar. La solución que estaría un poco en el límite de no saber si ejecutarla es la que consiste en mantener el espesor del aislamiento térmico del cerramiento en el pilar, habría que entrar a valorar el caso en concreto, la pérdida de superficie útil o el coste económico. La solución que se descarta automáticamente es la que supone pasar 1,5 veces el aislamiento, puesto que la mejora térmica que produce es reducida (6,91%) y la superficie útil que se pierde con esta solución es considerable, sin contar con el incremento que supondría en el presupuesto.

En la Figura 56 se ha comparado con una superficie determinada, la reducción de superficie útil que supondría la solución constructiva de pasar 1,5 veces el aislamiento o el mismo espesor de aislamiento que en el cerramiento con respecto a la solución de pasar la mitad. En la Figura 56b, solución constructiva con relación 1 en el aislamiento, se puede ver una reducción de superficie interior útil del 3,71%, mientras que en la Figura 56c, solución constructiva con relación 1,5 en el aislamiento, se puede ver una reducción de la superficie del 7,41%.

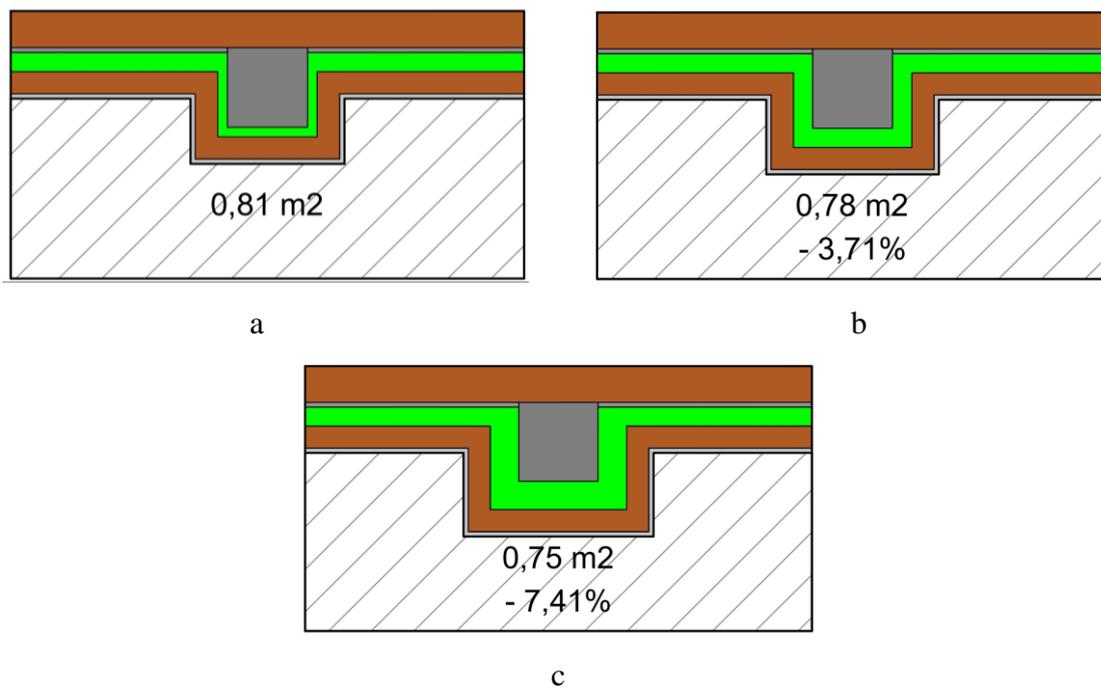


Figura 56. Reducción de la superficie interior útil. Fuente: elaboración propia.

La quinta hipótesis planteada relacionada con esta tipología de fachada es:

“La continuidad del aislamiento por el exterior es mejor solución que la continuidad del aislamiento por el interior produciendo el forrado del pilar”

Los resultados obtenidos confirman esta hipótesis. En las soluciones constructivas donde el aislamiento se pasa por la cara exterior del pilar las pérdidas energéticas son menores. En la Figura 57 se pueden ver dos gráficos, son dos soluciones constructivas de idénticas características, salvo la posición del aislamiento: a) posición exterior; b) posición interior. Se puede ver claramente la diferencia entre uno y otro.

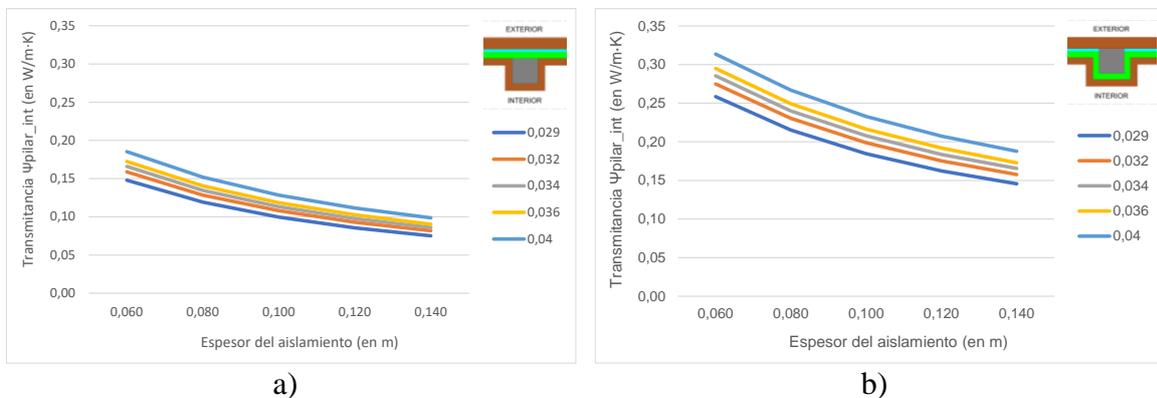


Figura 57. Gráficos del comportamiento térmico según la posición del aislamiento térmico.
Fuente: elaboración propia.

La sexta hipótesis planteada relacionada con esta tipología de fachada es:

“No existe solución constructiva que reduzca la pérdida energética cuando el aislamiento es discontinuo en el pilar”

Se rechaza la hipótesis, conforme a los resultados obtenidos se observa que existen variables como la conductividad del aislamiento que no resulta ser influyente en el comportamiento térmico, mientras que, otras variables como la cámara de aire, la posición y el forrado del pilar y el espesor del aislamiento son variables que influyen en el valor de la transmitancia térmica lineal.

Se ha visto que la ejecución de una cámara de aire de 3 cm se puede reducir hasta un 7% el valor de la transmitancia térmica lineal con respecto de una solución constructiva en la que no se ejecuta la misma.

También se ha podido observar que la solución constructiva que implica el forrado del pilar puede suponer una mejora de hasta un 14% en el comportamiento térmico.

En todos los gráficos analizados en los que existe una discontinuidad en el aislamiento, aparte de no apreciarse la diferencia entre conductividades, también se podían apreciar pendientes muy pronunciadas en los aumentos de espesores, lo que significa que el espesor es una variable muy influyente para estas soluciones constructivas.

Por último, también se ha podido observar que se obtienen valores de transmitancia térmica lineal menores cuando el pilar se coloca por el interior. La mejora puede ser de hasta un 19% con la colocación interior del pilar con respecto a la posición exterior.

La séptima hipótesis planteada relacionada con esta tipología de fachada es:

“Cuando el aislamiento es continuo, la posición del pilar dentro del cerramiento (exterior, embebido o interior) no es una variable influyente”

Se rechaza la hipótesis, los resultados obtenidos muestran que la posición del pilar es una variable muy influyente. Cuando el aislamiento pasa por el interior el comportamiento térmico es mejor si el pilar está situado enrasado al exterior. La explicación para esto es la misma que ya se ha explicado anteriormente con la existencia del forrado, al hacer pasar el aislamiento por el interior del cerramiento lo que se está haciendo es aumentar la dimensión de ese puente térmico, cuanto más retranqueado esté el pilar de la línea de fachada, mayor es la dimensión del puente térmico (Figura 58).

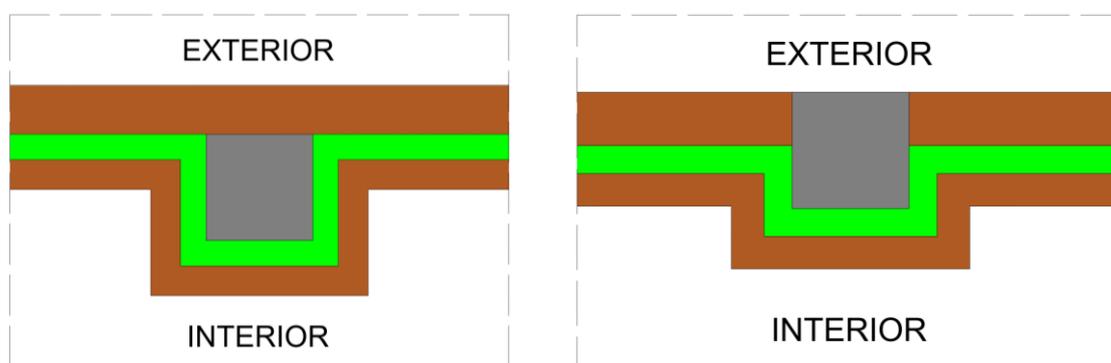


Figura 58. Comparativa de la dimensión del puente térmico en función de la posición del pilar.
Fuente: elaboración propia.

Otro aspecto para tener en cuenta es que se está tratando una fachada de ladrillo caravista, y no suele ser una solución habitual enrasar el pilar al exterior, por lo que, para

este tipo de fachada, buscando el mejor comportamiento térmico se tendría que recurrir a la solución constructiva de pasar el aislamiento por el exterior, con la posición del pilar interior.

La octava hipótesis planteada relacionada con esta tipología de fachada es:

“La existencia de una cámara de aire en el cerramiento reduce el valor de la transmitancia térmica lineal”

La hipótesis propuesta se confirma, ya que el disponer de cámara influye positivamente, y su ejecución produce una reducción de la transmitancia térmica lineal, según los resultados obtenidos se puede afirmar que esta reducción está entre un 6 y un 9%, comparando los valores obtenidos para espesores de 6 cm y conductividades de 0,029 [W/(m·K)] en el aislante térmico.

Con estos resultados y habiendo analizado el efecto que producen otras variables como la posición del pilar o la relación de espesores entre el cerramiento y el pilar, se puede decir que la cámara de aire influye en el comportamiento del puente térmico, reduciendo el valor de la transmitancia térmica lineal.

En la Tabla 29 se recogen las diferentes hipótesis planteadas en relación con la fachada caravista y la conclusión de estas.

Tabla 29. Resumen hipótesis fachada caravista. Fuente: elaboración propia.

NÚM.	HIPÓTESIS CARAVISTA	CONFIRMA / RECHAZA
3	El forrado del pilar reduce el puente térmico	SE RECHAZA (Grupo 1)
		SE CONFIRMA (Grupo 2)
4	La continuidad del aislamiento térmico en el pilar implica una reducción considerable en el puente térmico	SE CONFIRMA
5	La continuidad del aislamiento por el exterior es mejor solución que la continuidad del aislamiento por el interior produciendo el forrado del pilar	SE CONFIRMA
6	No existe solución constructiva que reduzca la pérdida energética cuando el aislamiento es discontinuo en el pilar	SE RECHAZA
7	Cuando el aislamiento es continuo, la posición del pilar dentro del cerramiento (exterior, embebido o interior) no es una variable influyente	SE RECHAZA
8	La existencia de una cámara de aire en el cerramiento reduce el valor de la transmitancia térmica lineal	SE CONFIRMA

4.3 FACHADA SATE

Para la tipología de fachada SATE se han analizado las siguientes variables: forrado del pilar y tipo de trasdosado. Para realizar este análisis se plantean las hipótesis 9, 10 y 11. La novena hipótesis formula que:

“Los sistemas de fachada SATE consiguen eliminar por completo el puente térmico”

Se rechaza la hipótesis debido a que se han analizado seis soluciones constructivas diferentes para esta tipología de fachada, en ninguna de las soluciones se ha obtenido un valor de transmitancia térmica lineal igual a 0. El valor más pequeño que se ha obtenido ha sido de 0,0556 [W/(m·K)], para soluciones con espesores de 14 cm y conductividad de 0,029 [W/(m·K)] en el aislante térmico, es un valor muy pequeño, pero no se elimina por completo el puente térmico.

Considerando las limitaciones de este trabajo se observa que no se puede eliminar el puente térmico, al mismo tiempo no se puede afirmar que no se puedan obtener mejores resultados aumentando el espesor del aislamiento. Aun así, un espesor de 14 cm de aislamiento se considera espesor importante para una fachada ubicada en la mayor parte del territorio español.

La décima hipótesis planteada relacionada con esta tipología de fachada es:

“La tipología de fachada SATE con trasdosado de placa de yeso laminado autoportante se va a comportar mejor cuando se coloca aislamiento térmico en su interior que cuando no lo lleva”

Se acepta en el caso de soluciones constructivas que tienen el trasdosado del pilar (Figura 52c y Figura 52d, p. 88) conforme a los resultados obtenidos y analizados. Se ha visto que cuando se comparan las dos soluciones constructivas con trasdosado del pilar, se obtienen valores de transmitancia térmica lineal menores si el trasdosado va con aislamiento, con un valor de 0,1514 [W/(m·K)], mientras que si se deja la cámara de aire el valor es de 0,1539 [W/(m·K)], en ambos casos para soluciones con espesores de 6 cm y conductividad de 0,029 [W/(m·K)] en el aislante térmico.

La undécima hipótesis planteada relacionada con esta tipología de fachada es:

“La tipología de fachada SATE reduce el puente térmico cuando en el pilar por el interior se realiza un forrado con tabiquería cerámica o un trasdosado de placa de yeso laminado autoportante”

Se rechaza la hipótesis planteada tanto para la ejecución de un trasdosado cerámico en el pilar, como la ejecución de uno con placa de yeso laminado autoportante.

Para el caso de la ejecución de un trasdosado cerámico, Figura 52b (p. 88), donde se obtienen peores resultados que en la solución constructiva en la que el pilar se reviste con un enlucido de yeso, Figura 52a (p. 88). Obteniendo valores de 0,1699 [W/(m·K)], reduciéndose este valor a 0,1225 [W/(m·K)] si no se ejecuta el trasdosado cerámico, ambos casos para soluciones con espesores de 6 cm y conductividad de 0,029 [W/(m·K)] en el aislante térmico.

Lo mismo pasa con el trasdosado de PYL autoportante, para la solución constructiva con aislamiento en el trasdosado (Figura 52d y Figura 52f, p. 88) y la solución con cámara de aire en el trasdosado (Figura 52c y Figura 52e, p. 88). Al comparar dos soluciones constructivas, ambas con cámara de aire en el trasdosado, una con trasdosado de PYL (Figura 52c, p. 88) y otro con un revestimiento interior con yeso (Figura 52e, p. 88), se obtienen resultados mejores térmicamente hablando para la solución constructiva con un revestimiento interior de yeso con un valor de 0,1222 [W/(m·K)], ascendiendo a un valor de 0,1539 [W/(m·K)] si se ejecuta el trasdosado, en ambos casos para soluciones con espesores de 6 cm y conductividad de 0,029 [W/(m·K)] en el aislante térmico.

En la Tabla 30 se recogen las diferentes hipótesis planteadas para fachada SATE.

Tabla 30. Resumen hipótesis fachada SATE. Fuente: elaboración propia.

NÚM.	HIPÓTESIS SATE	CONFIRMA / RECHAZA
9	Los sistemas de fachada SATE consiguen eliminar por completo el puente térmico	SE RECHAZA
10	La tipología de fachada SATE con trasdosado de placa de yeso laminado autoportante se va a comportar mejor cuando se coloca aislamiento térmico en su interior que cuando no lo lleva	SE CONFIRMA
11	La tipología de fachada SATE reduce el puente térmico cuando en el pilar por el interior se realiza un forrado con tabiquería cerámica o un trasdosado de placa de yeso laminado autoportante	SE RECHAZA

4.4 COMPARATIVA FACHADA SATE Y FACHADA CARAVISTA

Para la comparativa de la fachada SATE y la de caravista se plantean las hipótesis 12, 13 y 14. La duodécima hipótesis formula que:

“La tipología de fachada SATE reduce más el puente térmico en los pilares integrados en fachada que las fachadas de ladrillo caravista”

Se acepta la hipótesis propuesta conforme a los resultados obtenidos y analizados. Se puede afirmar que los resultados en tipología de fachada SATE son mejores, térmicamente hablando, que los obtenidos para las soluciones constructivas de tipología de fachada caravista.

Para tipología de fachada caravista se han obtenido una gran variedad de valores, siendo el mayor valor de puente térmico obtenido de 0,9303 [W/(m·K)] y el menor de ellos de 0,1052 [W/(m·K)]. Mientras que para la tipología de fachada SATE, el abanico de valores obtenidos es más pequeño, siendo el valor más alto para una solución de esta tipología de 0,2207 [W/(m·K)] y el valor más bajo de 0,0556 [W/(m·K)], observándose una diferencia significativa tanto en los valores más altos como en los más bajos obtenidos para cada una de las tipologías de fachada.

La decimotercera hipótesis planteada relacionada con esta tipología de fachada es:

“Las soluciones constructivas de fachada de LCV y fachada SATE no son comparables”

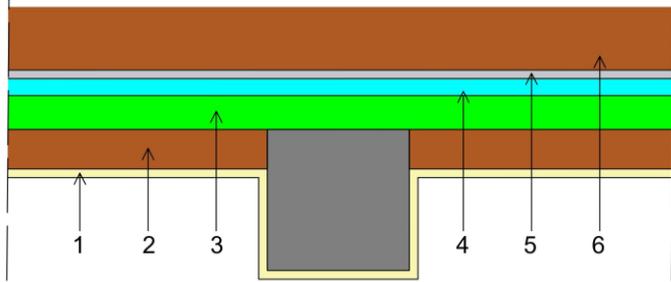
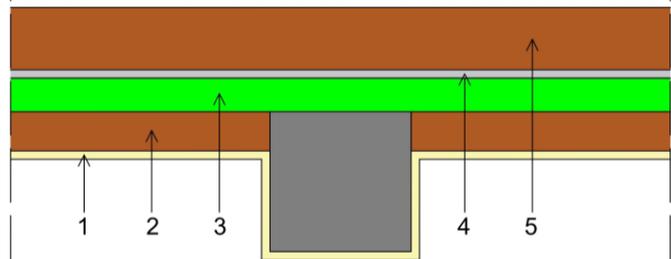
Se acepta la hipótesis propuesta ya que no son comparables debido a la variabilidad de resultados obtenidos en fachadas de LCV, a consecuencia de la diversidad de soluciones constructivas en el pilar (aislamiento continuo por el interior, por el exterior, relación existente entre el aislante del cerramiento y del pilar) y esta variabilidad tan grande no se produce en las fachadas SATE, luego los valores son más constantes.

La decimocuarta hipótesis planteada relacionada con esta tipología de fachada es:

“Las pérdidas energéticas que se producen en los pilares integrados en fachadas son menores cuando se ejecutan fachadas SATE frente a las fachadas que se resuelven con LCV”

Esta hipótesis se rechaza ya que existen soluciones con fachadas de LCV donde las pérdidas energéticas en pilares integrados en fachadas son menores que las obtenidas con fachadas SATE. Estas soluciones constructivas son dos y se muestran en la Tabla 31.

Tabla 31. Características de las soluciones constructivas de fachada caravista con mejores resultados térmicos que la tipología de fachada SATE. Fuente: elaboración propia.

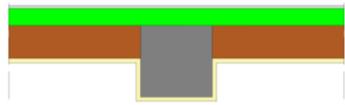
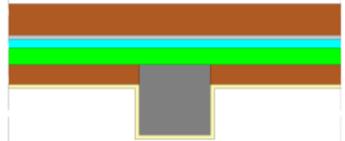
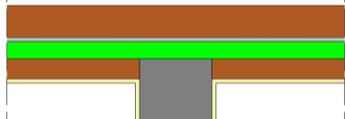
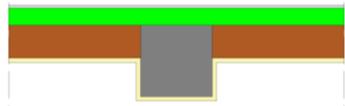
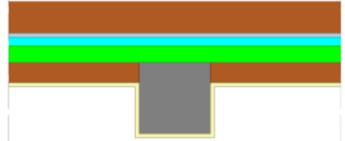
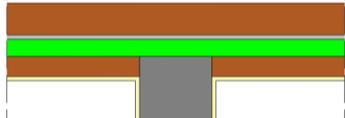
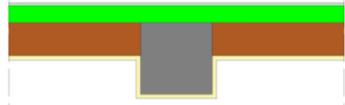
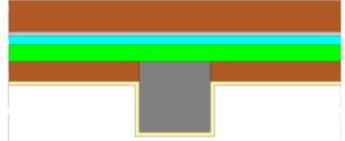
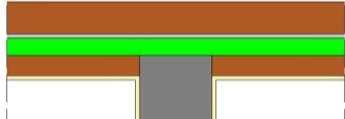
Solución constructiva 1		
Sección constructiva	Id	Materiales
 <p>Figura 59. Detalle constructivo 1 con mejores resultados de fachada caravista. Fuente: elaboración propia.</p>	1	Enlucido de yeso
	2	Ladrillo hueco
	3	Aislamiento térmico
	4	Cámara de aire
	5	Mortero de cemento
	6	Ladrillo perforado
Solución constructiva 2		
Sección constructiva	Id	Materiales
 <p>Figura 60. Detalle constructivo 2 con mejores resultados de fachada caravista. Fuente: elaboración propia.</p>	1	Enlucido de yeso
	2	Ladrillo hueco
	3	Aislamiento térmico
	4	Mortero de cemento
	5	Ladrillo perforado

Ambas soluciones constructivas tienen las siguientes características comunes: posición interior del pilar, aislamiento por el exterior, sin forrado del pilar y con relación 1 entre el espesor de aislamiento en el cerramiento y en el pilar. Se diferencian en que la solución constructiva 1 (Tabla 31, p. 110) se ejecuta una cámara de aire de 3 cm y en la solución constructiva 2 (Tabla 31, p. 110) no se ejecuta esta cámara.

Los valores obtenidos para la solución constructiva SATE y los de la solución de ladrillo caravista, con cámara de aire (solución constructiva 1) y sin cámara de aire (solución constructiva 2), son los que se muestran en la Tabla 32.

Tabla 32. Resultados de transmitancia obtenidos para las soluciones de LCV con menores pérdidas energéticas y la solución SATE con mejor comportamiento térmico. Fuente: elaboración propia.

Conductividad del aislamiento [W/(m·K)]	Tipología de fachada	Espesor del aislamiento (cm)				
		6 cm	8 cm	10 cm	12 cm	14 cm
0,029	 SATE	0,1225	0,0942	0,0765	0,0644	0,0556
	 LCV con cámara	0,1052	0,0836	0,0693	0,0592	0,0516
	 LCV sin cámara	0,1126	0,088	0,0724	0,0615	0,0535
0,032	 SATE	0,1338	0,1031	0,0839	0,0707	0,0611
	 LCV con cámara	0,1134	0,0905	0,0754	0,0645	0,0564
	 LCV sin cámara	0,122	0,096	0,0789	0,0672	0,0584

Conductividad del aislamiento [W/(m·K)]	Tipología de fachada	Espesor del aislamiento (cm)				
		6 cm	8 cm	10 cm	12 cm	14 cm
0,034	 SATE	0,1413	0,1090	0,0888	0,0749	0,0647
	 LCV con cámara	0,1188	0,095	0,0793	0,0679	0,0595
	 LCV sin cámara	0,1281	0,1009	0,0833	0,0709	0,0618
0,036	 SATE	0,1486	0,1148	0,0936	0,0789	0,0684
	 LCV con cámara	0,1238	0,0994	0,0831	0,0714	0,0625
	 LCV sin cámara	0,1342	0,1061	0,0876	0,0746	0,065
0,040	 SATE	0,1629	0,1264	0,1032	0,0872	0,0754
	 LCV con cámara	0,1339	0,1081	0,0905	0,0779	0,0686
	 LCV sin cámara	0,1459	0,1159	0,096	0,082	0,0715

Comparando los valores de la Tabla 32 (p. 111) se puede ver que existe una diferencia entre los resultados de las diferentes soluciones constructivas. Esta diferencia es mínima, pero existe, siendo la que mejor comportamiento tiene la solución constructiva de caravista con cámara de aire con un valor de $0,1052 [W/(m \cdot K)]$, frente al valor de $0,1225 [W/(m \cdot K)]$ de la solución SATE en ambos casos para soluciones con espesores de 6 cm y conductividad de $0,029 [W/(m \cdot K)]$ en el aislante térmico.

Por lo tanto, sí que existen soluciones mejores que un SATE y, este trabajo muestra las dos soluciones que mejor se comportan. Al mismo tiempo, conforme se muestra en la Tabla 32 (p. 111), resaltar que las tres soluciones constructivas presentan soluciones térmicas similares y con resultados muy buenos, por lo que, según la situación y condiciones del edificio, optar por cualquiera de las tres es una buena opción.

Por ejemplo, si se trata de una edificación existente y se pretende una rehabilitación, la solución SATE es la que más ventajas proporciona, principalmente porque consistiría en la ejecución por el exterior del aislamiento, sin necesidad de modificar elementos en el interior de la edificación y sin tener que reducir la superficie interior útil de la vivienda.

Otro ejemplo, en edificios de obra nueva, si se pretende llevar instalaciones por el cerramiento de la fachada es necesario la ejecución de un trasdosado, por lo que sería mejor utilizar la solución de fachada caravista para conseguir un comportamiento similar al SATE y que sea posible el paso de instalaciones. Esta propuesta no está teniendo en cuenta otros puentes térmicos como el frente del forjado.

Existen multitud de ejemplos, lo que queda claro es que existen soluciones de fachada tradicional, en este caso caravista, que pueden sustituir e incluso mejorar un sistema SATE, para el caso concreto de puentes térmicos de pilares integrados en fachada, no pudiendo extrapolar estos resultados a otro tipo de puentes térmicos por lo que se rechaza la hipótesis planteada.

En la Tabla 33 (p. 114) se recogen las diferentes hipótesis planteadas para la comparativa entre la fachada SATE y la fachada caravista.

Tabla 33. Resumen de las hipótesis para la comparativa de fachada SATE y fachada caravista.
Fuente: elaboración propia.

NÚM.	HIPÓTESIS COMPARATIVA FACHADA SATE Y FACHADA CARAVISTA	CONFIRMA / RECHAZA
12	La tipología de fachada SATE reduce más el puente térmico en los pilares integrados en fachada que las fachadas de ladrillo caravista	SE CONFIRMA
13	Las soluciones constructivas de fachada de LCV y fachada SATE no son comparables	SE CONFIRMA
14	Las pérdidas energéticas que se producen en los pilares integrados en fachadas son menores cuando se ejecutan fachadas SATE frente a las fachadas que se resuelven con LCV	SE RECHAZA

5 CONCLUSIONES

El determinar las pérdidas energéticas que se producen en los puentes térmicos es una cuestión de gran relevancia para reducir el consumo energético de los edificios. Este trabajo se ha centrado en las pérdidas energéticas de los pilares integrados en los cerramientos de fachada, analizando las fachadas de ladrillo caravista y los sistemas de aislamiento térmico por el exterior (SATE).

Los dos objetivos principales que se pretendían con este trabajo eran el análisis del comportamiento térmico en los pilares integrados en fachada y la comparativa entre los valores de transmitancia térmica lineal aportados por el DA-DB-HE-3 y los obtenidos por métodos detallados en este trabajo y se ha conseguido. Tras este análisis y comparativa se llega a la conclusión de que los valores proporcionados están muy por debajo de la realidad para continuidades en el aislamiento y muy sobredimensionados para discontinuidades en el aislamiento, por lo que se recomienda al Ministerio de Fomento la modificación de estas tablas para aportar valores más fieles a la realidad, para el caso de pilares integrados en fachada, por ser el puente térmico estudiado, no pudiendo extrapolar este trabajo a otro puente térmico, aunque se piensa que pasará algo similar con el resto de los puentes térmicos.

Aparte de alcanzar el objetivo principal de este trabajo, se han cumplido todos los objetivos secundarios que se habían planteado al inicio. El primero de ellos era la elaboración de una base de datos del puente térmico objeto de este estudio para las tipologías de fachada planteadas. También se ha comparado el método simplificado con el detallado, obteniendo un porcentaje de error para el simplificado superior al 20% que indica la norma UNE-EN ISO 14683 (AENOR, 2020).

La continuidad del aislamiento se ha identificado como la variable más determinante en el valor de la transmitancia térmica lineal del puente térmico. Se ha demostrado que la continuidad del aislamiento en la totalidad del cerramiento de fachada resulta favorable en el comportamiento térmico.

Analizando los diferentes resultados obtenidos con la intención de encontrar la mejor solución constructiva para este tipo de puente térmico, sin poder extrapolar a cualquier otro tipo de puente térmico, se ha demostrado que dos de las soluciones constructivas de fachada caravista estudiadas, presentan un comportamiento térmico mejor que las soluciones constructivas con SATE.

Además de conseguir todos los objetivos planteados, se han podido confirmar o rechazar todas las hipótesis planteadas al inicio de este trabajo, al justificar estas hipótesis se han extraído numerosas conclusiones.

- Cuando la solución constructiva adoptada contempla la discontinuidad del aislamiento, no existe diferencia en el comportamiento térmico en función de las diferentes conductividades del aislamiento térmico, mientras que el aumento de espesor del aislante representa una mejora constante en el comportamiento térmico, produciéndose una reducción constante de la transmitancia térmica lineal del puente térmico, resultando siempre interesante ejecutar ese aumento de espesor en caso de ser posible.
- La ejecución de una cámara de aire de 3 cm supone una ligera mejora en el comportamiento térmico.
- Cuando la solución constructiva contempla la continuidad por el interior del aislamiento, la posición del pilar que presenta un mejor comportamiento térmico es la enrasada por el exterior. Además de mostrar una mejora continua en el comportamiento térmico a medida que se va aumentando el espesor de aislamiento en el pilar.
- Existen variables como es el forrado del pilar, que influyen de manera opuesta en función de si existe o no continuidad en el aislamiento. Si se produce la continuidad del aislamiento se ha visto que lo mejor es no forrar el pilar, mientras que, si no se produce esta continuidad, lo mejor es forrar el pilar para conseguir un mejor comportamiento térmico.
- Existen dos soluciones constructivas de caravista con un comportamiento mejor que el SATE para el puente térmico de pilares integrados en cerramientos de fachada.

- Se ha demostrado que las soluciones SATE en las que únicamente se reviste el pilar con yeso proporciona mejores resultados que las soluciones en las que se reviste el pilar, bien sea con un ladrillo cerámico o con el trasdosado de PYL.
- Como norma general la tipología de fachada SATE presenta un mejor comportamiento térmico que la fachada caravista, no obstante, no se consigue eliminar por completo el puente térmico con esta tipología de fachada.
- En soluciones constructivas tipo SATE con trasdosado de PYL no se observa diferencia considerable entre trasdosado con cámara de aire o con aislamiento, y se llega a la conclusión de que la variable influyente en estos casos es la ejecución o no del forrado del pilar.

5.1 LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN

De todos los puentes térmicos que existen se ha tenido que elegir un tipo de puente térmico, puesto que no es posible abarcarlos todos en un único Proyecto Final de Grado, de forma que se generan potenciales líneas de trabajo que complementan el aquí desarrollado.

A continuación, se presentan futuras líneas de investigación considerando que se pretende investigar sobre la misma tipología de puente térmico:

- Se puede realizar las mismas soluciones con diferentes dimensiones de pilar (30x30 cm, 35x35 cm, 30x40 cm, etc.) y disposiciones y ver cómo afectan a la transmitancia térmica del pilar.
- Dentro de las tipologías de fachadas analizadas en este TFG (caravista y SATE) también se puede cambiar el espesor y material de la hoja principal, así como cambiar el trasdosado cerámico en la tipología de fachada caravista por un trasdosado de placa de yeso laminado.
- Se pueden modelar todas las tipologías de fachadas que recoge el Catálogo de Elementos Constructivos (Ministerio de Fomento, 2011), como por ejemplo fachadas ventiladas, tradicionales con cámara de aire ventilada o con revestimiento discontinuo.

Si lo que se pretende investigar es otro tipo de puente térmico (frentes de forjado, huecos, arranques de fachada, etc.), se pueden aplicar los mismos criterios que se utilizan en este estudio, adaptados al tipo de puente térmico e incluso aplicar las ampliaciones mencionadas antes a un puente térmico completamente diferente. Por lo que la investigación, cambiando el puente térmico, también podría considerarse prácticamente ilimitada.

Por lo que, se puede afirmar que existen múltiples líneas futuras de investigación.

6 BIBLIOGRAFÍA

AENOR. (2012). *Norma UNE-EN ISO 10211*. Madrid: AENOR.

AENOR. (2016). *Norma UNE-EN ISO 13788*. Madrid: AENOR.

AENOR. (2020). *Norma UNE-EN ISO 14683*. Madrid: AENOR.

APA.org. (2022). *apa.org*. Recuperado el 19 de abril de 2023, de <https://apa.org.es/que-es-el-formato-apa/>

Autodesk. (2022). *Autocad*, Version 2022.1.3. Obtenido de <https://www.autodesk.com/company>

Baba, F. M., & Ge, H. (2015). Dynamic effect of thermal bridges on the energy performance of a low-rise residential building. *Energy and Buildings*, 105, 106-118. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.07.023>

Campos, G. (s.f.). *Ecoeficiente*. Recuperado el 15 de abril de 2023, de Ecoeficiente: <https://ecoeiciente.es/libreria-cte-para-therm/>

Chen, Y., Tsai, C., & Lee, Y. (Diciembre de 2011). Early-life indoor environmental exposures increase the risk of childhood asthma. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 215(1), 19-25. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2011.07.004>

Curcija, C., Gao, Y., Yu, T., Yu, L., Czarnecki, S., Dickerhoff, D., . . . Wang, T. (2022). *THERM Finite Element Simulator*. California: Lawrence Berkeley National Laboratory, Versión 7.8.57.0. Obtenido de <https://windows.lbl.gov/software/therm>

Dales, R., Burnett, R., & Zwanenburg, H. (1991). Adverse health effects among adults exposed to home dampness and molds. (A. T. Society, Ed.) *American Review of Respiratory Disease*, 143(3), 505-509. doi:<https://doi.org/10.1164/ajrccm/143.3.505>

Díaz Regodón, M., & Tenorio Ríos, J. (agosto de 2005). Pérdidas de calor y formación de condensaciones en los puentes térmicos de los edificios. (Consejo Superior de Investigaciones Científicas (E, Ed.) Recuperado el 24 de abril de 2023, de <http://hdl.handle.net/10261/5864>

Dotterud, L., Odland, J., & Falk, E. (2000). Atopic diseases among adults in the two geographically related arctic areas Nikel, Russia and Sør-Varanger, Norway: Possible effects of indoor and outdoor air pollution. *Journal of the European Academy of Dermatology and Venereology*, 14(2), 107-111. doi:<https://doi.org/10.1046/j.1468-3083.2000.00027.x>

ecoavant. (10 de noviembre de 2022). Obtenido de https://www.ecoavant.com/contaminacion/emisiones-co2-construccion-aumentan_9779_102.html

El Parlamento Europeo y el Consejo de la Unión Europea. (2002). *Directiva 2002/91/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 16 de diciembre de 2002 relativa a la eficiencia energética de los edificios*. Diario Oficial de la Unión Europea. Obtenido de <http://data.europa.eu/eli/dir/2002/91/oj>

El Parlamento Europeo y el Consejo de la Unión Europea. (2010). *Directiva 2010/31/UE del Parlamento Europeo y del Consejo de 19 de mayo de 2010 relativa a la eficiencia energética de los edificios*. Diario Oficial de la Unión Europea. Recuperado el 15 de abril de 2023, de <http://data.europa.eu/eli/dir/2010/31/oj>

El Parlamento Europeo y el Consejo de la Unión Europea. (2012). *Directiva 2012/27/UE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 25 de octubre de 2012, relativa a la eficiencia energética, por la que se modifican las Directivas 2009/125/CE y 2010/30/UE, y por la que se derogan las Directivas 2004/8/CE y 2006/32/CE*. Diario Oficial de la Unión Europea. Obtenido de <http://data.europa.eu/eli/dir/2012/27/oj>

El Parlamento Europeo y el Consejo de la Unión Europea. (2018). *Directiva (UE) 2018/844 del Parlamento Europeo y del Consejo de 30 de mayo de 2018 por la que se modifica la Directiva 2010/31/UE relativa a la eficiencia energética de los edificios y la Directiva 2012/27/UE relativa a la eficiencia energética*. Diario Oficial de la Unión Europea. Obtenido de <http://data.europa.eu/eli/dir/2018/844/oj>

García Tormo, D. (2022). *Estudio de puentes térmicos en pilares integrados de fachada tradicional*. Alicante: Universidad de Alicante. Obtenido de <http://hdl.handle.net/10045/127146>

- Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. (1995). *IPCC-Segunda Evaluación Cambio Climático 1995*. Recuperado el 6 de mayo de 2023, de <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/06/2nd-assessment-sp.pdf>
- Jefatura del Estado. (2005a). *Instrumento de Ratificación del Protocolo de Kyoto al Convenio Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, hecho en Kyoto el 11 de diciembre de 1997* (Vol. 33). España: Boletín Oficial del Estado. Obtenido de <https://www.boe.es/eli/es/ai/1997/12/11/1>
- Jefatura del Estado. (2005b). *Ley 1/2005, de 9 de marzo, por la que se regula el régimen del comercio de derechos de emisión de gases de efecto invernadero* (Vol. 59). España: Boletín Oficial del Estado. Obtenido de <https://www.boe.es/eli/es/l/2005/03/09/1/con>
- Kotti, S., Teli, D., & James, P. (2017). Quantifying Thermal Bridge Effects and Assessing Retrofit Solutions in a Greek Residential Building. *Procedia Environmental Sciences*, 38, 306-313. doi:<https://doi.org/10.1016/j.proenv.2017.03.084>
- Macari Urra, B. (2013). *Análisis y medición del nivel de infiltración de aire y puentes térmicos en espacios de oficina*. Santiago de Chile. Recuperado el 24 de abril de 2023, de <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/114478>
- Microsoft Corporation. (2022). *Excel*. Obtenido de <https://www.microsoft.com/es-mx/microsoft-365/excel>
- Microsoft Corporation. (2023). *Word*. Obtenido de <https://www.microsoft.com/es-es/microsoft-365/free-office-online-for-the-web>
- Ministerio de Fomento. (octubre de 2011). *Catálogo de Elementos Constructivos*. Recuperado el 15 de abril de 2023, de Catálogo de Elementos Constructivos: <https://itec.cat/cec/>
- Ministerio de Fomento. (2014). *Documento de Apoyo al Documento Básico DB-HE Ahorro de energía Código Técnico de la Edificación. DA DB-HE / 3*. España. Obtenido de https://www.codigotecnico.org/pdf/Documentos/HE/DA-DB-HE-3_Puentes_termicos.pdf
- Ministerio de Fomento. (2017). *Orden FOM/588/2017, de 15 de junio, por la que se modifican el Documento Básico DB-HE "Ahorro de energía" y el Documento Básico*

DB-HS "Salubridad", del Código Técnico de la Edificación, aprobado por Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo. España: Boletín Oficial del Estado. Obtenido de <https://www.boe.es/eli/es/o/2017/06/15/fom588>

Ministerio de Fomento. (2019). *Real Decreto 732/2019, de 20 de diciembre, por el que se modifica el Código Técnico de la Edificación, aprobado por el Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo* (Vol. 311). España: Boletín Oficial del Estado. Obtenido de <https://www.boe.es/eli/es/rd/2019/12/20/732>

Ministerio de la Presidencia. (2006). *Real Decreto 1370/2006, de 24 de noviembre, por el que se aprueba el Plan Nacional de Asignación de derechos de emisión de gases de efecto invernadero, 2008-2012* (Vol. 282). España: Boletín Oficial del Estado. Obtenido de <https://www.boe.es/eli/es/rd/2006/11/24/1370>

Ministerio de la Presidencia. (2007a). *Real Decreto 1027/2007, de 20 de julio, por el que se aprueba el Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios.* (Vol. 207). España: Boletín Oficial del Estado. Obtenido de <https://www.boe.es/eli/es/rd/2007/07/20/1027/con>

Ministerio de la Presidencia. (2007b). *Real Decreto 47/2007, de 19 de enero, por el que se aprueba el Procedimiento básico para la certificación de eficiencia energética de edificios de nueva construcción.* España: Boletín Oficial del Estado. Obtenido de <https://www.boe.es/eli/es/rd/2007/01/19/47>

Ministerio de la Presidencia. (2013). *Real Decreto 235/2013, de 5 de abril, por el que se aprueba el procedimiento básico para la certificación de la eficiencia energética de los edificios.* (Vol. 89). España: Boletín Oficial del Estado. Obtenido de <https://www.boe.es/eli/es/rd/2013/04/05/235/con>

Ministerio de la Presidencia y para las Administraciones Territoriales. (2017). *Real Decreto 564/2017, de 2 de junio, por el que se modifica el Real Decreto 235/2013, de 5 de abril, por el que se aprueba el procedimiento básico para la certificación de la eficiencia energética de los edificios.* España: Boletín Oficial del Estado. Obtenido de <https://www.boe.es/eli/es/rd/2017/06/02/564>

Ministerio de la Presidencia, Relaciones con las Cortes y Memoria Democrática. (2021). *Real Decreto 390/2021, de 1 de junio, por el que se aprueba el procedimiento básico para la certificación de la eficiencia energética de los edificios.* (Vol. 131). España:

- Boletín Oficial del Estado. Obtenido de <https://www.boe.es/eli/es/rd/2021/06/01/390/con>
- Ministerio de la Presidencia, Relaciones con las Cortes y Memoria Democrática. (2022). *Real Decreto 450/2022, de 14 de junio, por el que se modifica el Código Técnico de la Edificación, aprobado por el Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo* (Vol. 142). España: Boletín Oficial del Estado. Obtenido de <https://www.boe.es/eli/es/rd/2022/06/14/450>
- Ministerio de Transporte, Movilidad y Agenda Urbana. (2020). *Documento de Apoyo al Documento Básico DB-HE Ahorro de energía. Código Técnico de la Edificación. DA DB-HE / 1*. España. Obtenido de https://www.codigotecnico.org/pdf/Documentos/HE/DA_DB-HE-1_Calculo_de_parametros_caracteristicos_de_la_envolvente.pdf
- Ministerio de Transporte, Movilidad y Agenda Urbana. (2022). *Documento Básico HE Ahorro de Energía con comentarios del MITMA*. España.
- Ministerio de Vivienda. (2006). *Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo, por el que se aprueba el Código Técnico de la Edificación*. (Vol. 74). España: Boletín Oficial del Estado. Obtenido de <https://www.boe.es/eli/es/rd/2006/03/17/314/con>
- Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (s.f.). *Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico*. Recuperado el 6 de mayo de 2023, de <https://www.miteco.gob.es/es/cambio-climatico/temas/mitigacion-politicas-y-medidas/objetivos.aspx>
- Naciones Unidas. (1992). *La Convención Marco de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*. Recuperado el 6 de mayo de 2023, de <https://unfccc.int/resource/docs/convkp/convsp.pdf>
- Naciones Unidas. (1998). *Protocolo de Kyoto de la Convención marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*. Recuperado el 6 de mayo de 2023, de <https://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpspan.pdf>
- Real Academia Española. (octubre de 2014). *Diccionario de la Lengua Española*. Obtenido de <https://dle.rae.es>

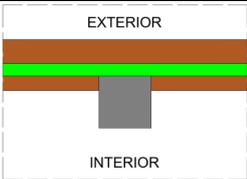
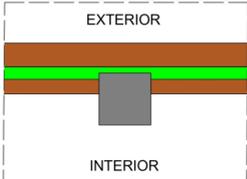
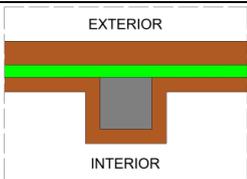
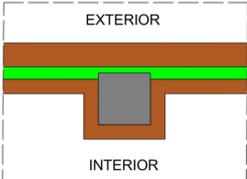
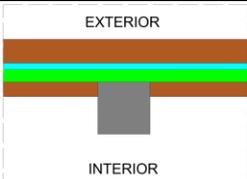
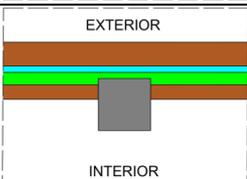
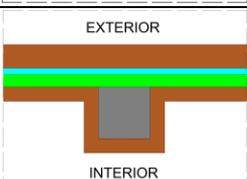
Theodosiou, T. G., & Papadopoulos, A. M. (2008). The impact of thermal bridges on the energy demand of buildings with double brick wall constructions. *Energy and Buildings*, 40(11), 2083-2089. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2008.06.006>

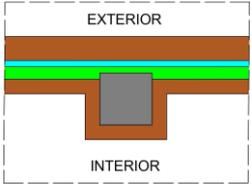
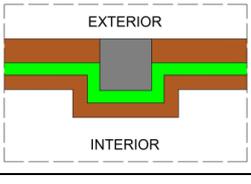
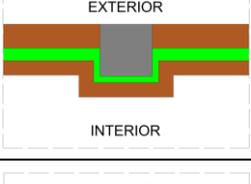
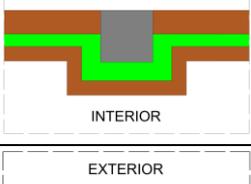
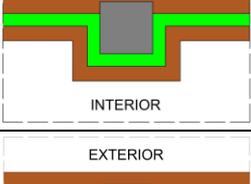
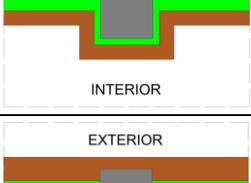
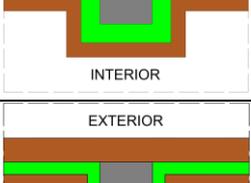
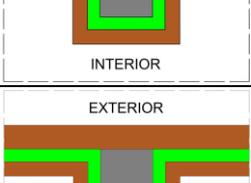
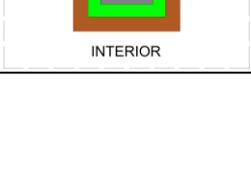
United Nations Environment Programme. (2022). *2022 Global Status Report for Buildings and Construction: Towards a Zero-emission, Efficient and Resilient Buildings and Construction Sector*. Nairobi. Recuperado el 6 de mayo de 2023, de https://globalabc.org/sites/default/files/2023-03/2022%20Global%20Status%20Report%20for%20Buildings%20and%20Construction_1.pdf

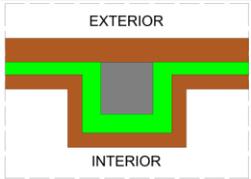
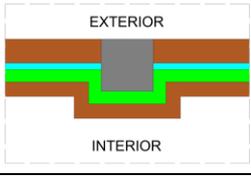
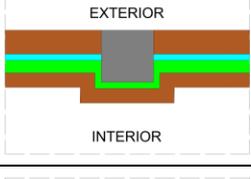
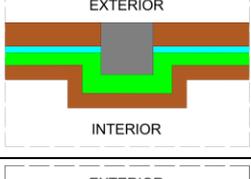
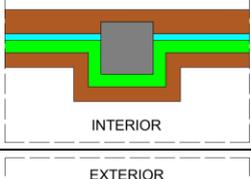
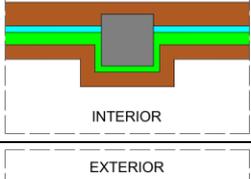
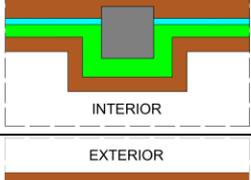
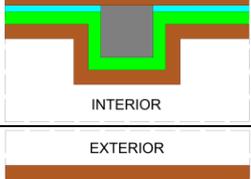
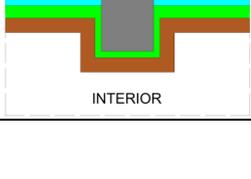
ANEXO 1. LISTA DE CASOS ANALIZADOS.

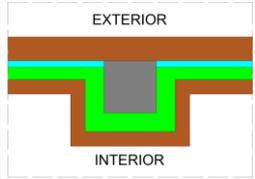
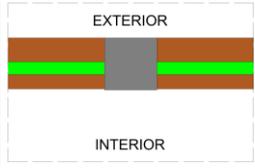
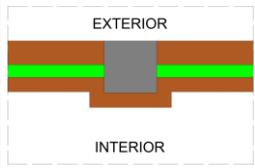
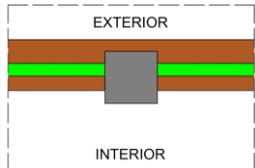
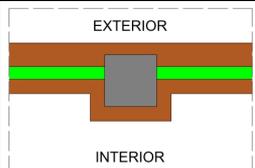
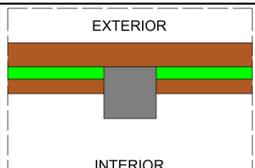
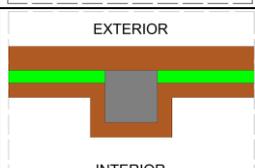
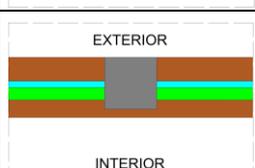
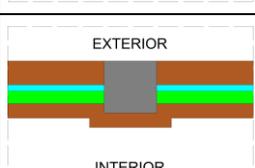
Los diferentes casos de fachada de ladrillo caravista que se producen por la combinación de todas las variables analizadas son los siguientes.

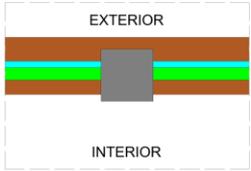
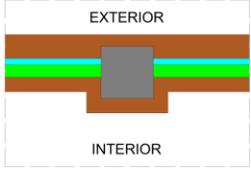
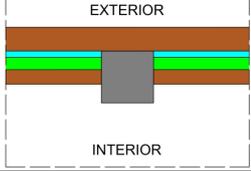
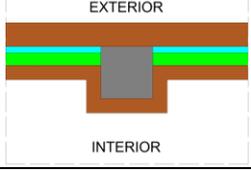
Tabla 34. Características constructivas de los diferentes casos de fachada caravista con los que se ha trabajado. Fuente: elaboración propia.

Caso	Esquema	Posición hoja prin.	Posición aisl-pilar	Continuidad aisla.	Relación aisla. pilar	Forrado pilar	Cámara de aire
1		Interior	Exterior	Con	1	Sin	Sin
2		Interior	Exterior	Con	0,5	Sin	Sin
3		Interior	Exterior	Con	1	Con	Sin
4		Interior	Exterior	Con	0,5	Con	Sin
5		Interior	Exterior	Con	1	Sin	Con
6		Interior	Exterior	Con	0,5	Sin	Con
7		Interior	Exterior	Con	1	Con	Con

Caso	Esquema	Posición hoja prin.	Posición aisl-pilar	Continuidad aisla.	Relación aisla. pilar	Forado pilar	Cámara de aire
8		Interior	Exterior	Con	0,5	Con	Con
9		Exterior	Interior	Con	1	Con	Sin
10		Exterior	Interior	Con	0,5	Con	Sin
11		Exterior	Interior	Con	1,5	Con	Sin
12		Embebido	Interior	Con	1	Con	Sin
13		Embebido	Interior	Con	0,5	Con	Sin
14		Embebido	Interior	Con	1,5	Con	Sin
15		Interior	Interior	Con	1	Con	Sin
16		Interior	Interior	Con	0,5	Con	Sin

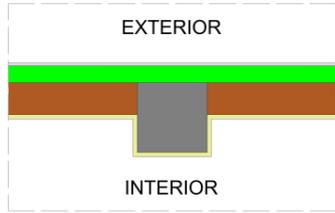
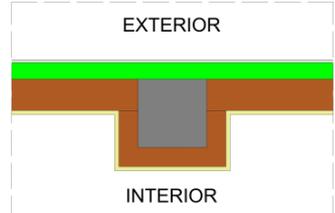
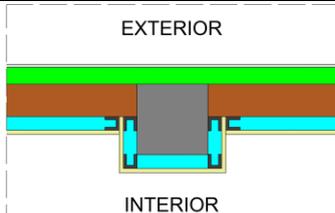
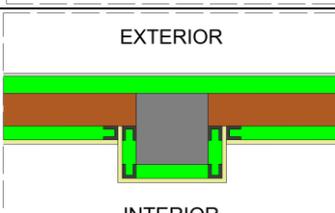
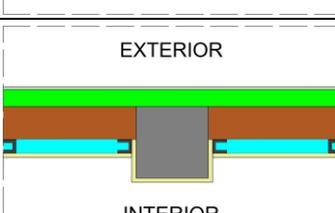
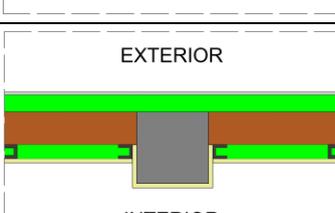
Caso	Esquema	Posición hoja prin.	Posición aisl-pilar	Continuidad aisla.	Relación aisla. pilar	Forado pilar	Cámara de aire
17		Interior	Interior	Con	1,5	Con	Sin
18		Exterior	Interior	Con	1	Con	Con
19		Exterior	Interior	Con	0,5	Con	Con
20		Exterior	Interior	Con	1,5	Con	Con
21		Embebido	Interior	Con	1	Con	Con
22		Embebido	Interior	Con	0,5	Con	Con
23		Embebido	Interior	Con	1,5	Con	Con
24		Interior	Interior	Con	1	Con	Con
25		Interior	Interior	Con	0,5	Con	Con

Caso	Esquema	Posición hoja prin.	Posición aisl-pilar	Continuidad aisl.	Relación aisl. pilar	Forrado pilar	Cámara de aire
26		Interior	Interior	Con	1,5	Con	Con
27		Exterior	Sin	Sin	0	Sin	Sin
28		Exterior	Sin	Sin	0	Con	Sin
29		Embebido	Sin	Sin	0	Sin	Sin
30		Embebido	Sin	Sin	0	Con	Sin
31		Interior	Sin	Sin	0	Sin	Sin
32		Interior	Sin	Sin	0	Con	Sin
33		Exterior	Sin	Sin	0	Sin	Con
34		Exterior	Sin	Sin	0	Con	Con

Caso	Esquema	Posición hoja prin.	Posición aisl-pilar	Continuidad aisla.	Relación aisla. pilar	Forrado pilar	Cámara de aire
35	 <p>EXTERIOR</p> <p>INTERIOR</p>	Embebido	Sin	Sin	0	Sin	Con
36	 <p>EXTERIOR</p> <p>INTERIOR</p>	Embebido	Sin	Sin	0	Con	Con
37	 <p>EXTERIOR</p> <p>INTERIOR</p>	Interior	Sin	Sin	0	Sin	Con
38	 <p>EXTERIOR</p> <p>INTERIOR</p>	Interior	Sin	Sin	0	Con	Con

Teniendo en cuenta que para fachada SATE la hoja principal es de ladrillo cerámico perforado, el aislamiento es continuo siempre, la posición de la hoja principal y del aislamiento siempre es exterior y nunca existe cámara de aire, se producen las siguientes combinaciones en función del forrado y del tipo de trasdosado.

Tabla 35. Características constructivas de los diferentes casos de fachada SATE con los que se ha trabajado. Fuente: elaboración propia.

Caso	Esquema	Trasdosado	Forrado pilar	Material forrado
1		Sin	Sin	*Enlucido de yeso
2		Sin	Con	Ladrillo hueco doble
3		PYL con cámara de aire	Con	PYL con cámara de aire
4		PYL con aislamiento	Con	PYL con aislamiento
5		PYL con cámara de aire	Sin	*Enlucido de yeso
6		PYL con aislamiento	Sin	*Enlucido de yeso

ANEXO 2. JUSTIFICACIÓN GRUPOS PUENTES TÉRMICOS.

Para poder establecer una clasificación se han extraído los valores de transmitancia (Umuro) y de la transmitancia térmica lineal (Ψ_i) de cada una de las soluciones constructivas, para tipología de fachada caravista, (Tabla 36) y para tipología de fachada SATE (Tabla 37, p. 132), ambas tipologías para espesores de 6 cm y conductividad de 0,029 [W/(m·K)] en el aislamiento térmico.

Los casos mencionados en las siguientes tablas corresponden a los explicados en el Anexo 1. Lista de casos analizados. (p. 125).

Tabla 36. Valores de transmitancia térmica lineal obtenidos de tipología caravista para espesores de 6 cm y conductividad de 0,029 [W/(m·K)] en el aislante térmico. Fuente: elaboración propia

Caso	Ψ_i W/(m·K)	Ψ_i redon W/(m·K)	U W/(m ² ·K)	Caso	Ψ_i W/(m·K)	Ψ_i redon W/(m·K)	U W/(m ² ·K)
Caso 1	0,1126	0,1100	0,3704	Caso 20	0,1910	0,1900	0,3481
Caso 2	0,1907	0,1900	0,3704	Caso 21	0,2401	0,2400	0,3481
Caso 3	0,1577	0,1600	0,3704	Caso 22	0,3203	0,3200	0,3481
Caso 4	0,2285	0,2300	0,3704	Caso 23	0,2069	0,2100	0,3481
Caso 5	0,1052	0,1100	0,3481	Caso 24	0,2586	0,2600	0,3481
Caso 6	0,1711	0,1700	0,3481	Caso 25	0,3393	0,3400	0,3481
Caso 7	0,1479	0,1500	0,3481	Caso 26	0,2227	0,2200	0,3481
Caso 8	0,2082	0,2100	0,3481	Caso 27	0,9303	0,9300	0,3704
Caso 9	0,2383	0,2400	0,3704	Caso 28	0,8011	0,8000	0,3704
Caso 10	0,3221	0,3200	0,3704	Caso 29	0,8697	0,8700	0,3704
Caso 11	0,2054	0,2100	0,3704	Caso 30	0,7437	0,7400	0,3704
Caso 12	0,2594	0,2600	0,3704	Caso 31	0,7480	0,7500	0,3704
Caso 13	0,3469	0,3500	0,3704	Caso 32	0,6719	0,6700	0,3704
Caso 14	0,2222	0,2200	0,3704	Caso 33	0,7649	0,7600	0,3481
Caso 15	0,2763	0,2800	0,3704	Caso 34	0,7440	0,7400	0,3481
Caso 16	0,3617	0,3600	0,3704	Caso 35	0,8204	0,8200	0,3481
Caso 17	0,2376	0,2400	0,3704	Caso 36	0,7028	0,7000	0,3481
Caso 18	0,2194	0,2200	0,3481	Caso 37	0,7242	0,7200	0,3481
Caso 19	0,2931	0,2900	0,3481	Caso 38	0,6475	0,6500	0,3481

Tabla 37. Valores de transmitancia térmica lineal obtenidos de tipología SATE para espesores de 6 cm y conductividad de 0,029 [W/(m·K)] en el aislante térmico. Fuente: elaboración propia.

Caso	Ψ_i W/(m·K)	Ψ_i redon W/(m·K)	U W/(m ² ·K)
Caso 1	0,1225	0,1200	0,3704
Caso 2	0,1699	0,1700	0,3704
Caso 3	0,1539	0,1500	0,3704
Caso 4	0,1514	0,1500	0,3704
Caso 5	0,1222	0,1200	0,3481
Caso 6	0,1406	0,1400	0,3481

Vistos estos valores, en especial la variedad de valores de transmitancia térmica lineal que existe para una misma Umuro se decide hacer una primera clasificación prestando atención únicamente al valor de la transmitancia, para una vez hecha la clasificación prestar atención en las variables coincidentes entre valores de transmitancia similares.

Se obtiene un primer grupo (Tabla 38) que coincide con las soluciones constructivas que consisten en pasar el aislamiento continuo por delante de la cara exterior del pilar.

Tabla 38. Grupo A con continuidad del aislamiento por el exterior. Fuente: elaboración propia.

Caso	Ψ_i W/(m·K)	Ψ_i redon W/(m·K)	U W/(m ² ·K)	Caso	Ψ_i W/(m·K)	Ψ_i redon W/(m·K)	U W/(m ² ·K)
Caso 1	0,1126	0,1100	0,3704	Caso 5	0,1052	0,1100	0,3481
Caso 2	0,1907	0,1900	0,3704	Caso 6	0,1711	0,1700	0,3481
Caso 3	0,1577	0,1600	0,3704	Caso 7	0,1479	0,1500	0,3481
Caso 4	0,2285	0,2300	0,3704	Caso 8	0,2082	0,2100	0,3481

Un segundo grupo (Tabla 39) que coincide con las soluciones con continuidad del aislamiento por el interior del edificio.

Tabla 39. Grupo B con continuidad del aislamiento por el interior. Fuente: elaboración propia.

Caso	Ψ_i W/(m·K)	Ψ_i redon W/(m·K)	U W/(m ² ·K)	Caso	Ψ_i W/(m·K)	Ψ_i redon W/(m·K)	U W/(m ² ·K)
Caso 9	0,2383	0,2400	0,3704	Caso 18	0,2194	0,2200	0,3481
Caso 10	0,3221	0,3200	0,3704	Caso 19	0,2931	0,2900	0,3481
Caso 11	0,2054	0,2100	0,3704	Caso 20	0,1910	0,1900	0,3481
Caso 12	0,2594	0,2600	0,3704	Caso 21	0,2401	0,2400	0,3481
Caso 13	0,3469	0,3500	0,3704	Caso 22	0,3203	0,3200	0,3481
Caso 14	0,2222	0,2200	0,3704	Caso 23	0,2069	0,2100	0,3481
Caso 15	0,2763	0,2800	0,3704	Caso 24	0,2586	0,2600	0,3481
Caso 16	0,3617	0,3600	0,3704	Caso 25	0,3393	0,3400	0,3481
Caso 17	0,2376	0,2400	0,3704	Caso 26	0,2227	0,2200	0,3481

Un tercer grupo Tabla 37 (p. 132) que coincide con las soluciones constructivas de tipología SATE.

Y por último un grupo (Tabla 40) que coincide con las soluciones constructivas en las que el aislamiento es discontinuo.

Tabla 40. Grupo D con discontinuidad del aislamiento. Fuente: elaboración propia.

Caso	Ψ_i W/(m·K)	Ψ_i redon W/(m·K)	U W/(m ² ·K)	Caso	Ψ_i W/(m·K)	Ψ_i redon W/(m·K)	U W/(m ² ·K)
Caso 27	0,9303	0,9300	0,3704	Caso 33	0,7649	0,7600	0,3481
Caso 28	0,8011	0,8000	0,3704	Caso 34	0,7440	0,7400	0,3481
Caso 29	0,8697	0,8700	0,3704	Caso 35	0,8204	0,8200	0,3481
Caso 30	0,7437	0,7400	0,3704	Caso 36	0,7028	0,7000	0,3481
Caso 31	0,7480	0,7500	0,3704	Caso 37	0,7242	0,7200	0,3481
Caso 32	0,6719	0,6700	0,3704	Caso 38	0,6475	0,6500	0,3481

Dentro del grupo A (Tabla 38, p. 132) se observa que se puede subdividir en función de la relación entre el aislamiento en el cerramiento y el del pilar, existe una diferencia notable, aunque no pronunciada entre los detalles constructivos con relación 0,5 y los de relación 1. Por lo que se decide subdividir en Grupo A1 (Tabla 41) para la relación 1 y Grupo A2 (Tabla 42) para la relación 0,5.

Tabla 41. Grupo A1 con continuidad del aislamiento por el exterior con relación 1 del aislamiento.
Fuente: elaboración propia.

Caso	Ψ_i W/(m·K)	Ψ_i redon W/(m·K)	U W/(m ² ·K)	
Caso 1	0,1126	0,1100	0,3704	
Caso 3	0,1577	0,1600	0,3704	
Caso 5	0,1052	0,1100	0,3481	
Caso 7	0,1479	0,1500	0,3481	

Tabla 42. Grupo A2 con continuidad del aislamiento por el exterior con relación 0,5 del aislamiento.
Fuente: elaboración propia.

Caso	Ψ_i W/(m·K)	Ψ_i redon W/(m·K)	U W/(m ² ·K)	
Caso 2	0,1907	0,1900	0,3704	
Caso 4	0,2285	0,2300	0,3704	
Caso 6	0,1711	0,1700	0,3481	
Caso 8	0,2082	0,2100	0,3481	

Dentro del grupo B (Tabla 39, p. 133) se observa que se puede subdividir en función de la relación entre el aislamiento en el cerramiento y el del pilar, existe una diferencia notable, aunque no pronunciada entre los detalles constructivos con relación 0,5 y los de relación 1 o superiores. Por lo que se decide subdividir en Grupo B1 (Tabla 43) para la relación 1 y superiores y Grupo B2 (Tabla 44) para la relación 0,5.

Tabla 43. Grupo B1 con continuidad del aislamiento por el exterior con relación 1 y superiores del aislamiento. Fuente: elaboración propia.

Caso	Ψ_i W/(m·K)	Ψ_i redon W/(m·K)	U W/(m ² ·K)	
Caso 9	0,2383	0,2400	0,3704	
Caso 11	0,2054	0,2100	0,3704	
Caso 12	0,2594	0,2600	0,3704	
Caso 14	0,2222	0,2200	0,3704	
Caso 15	0,2763	0,2800	0,3704	
Caso 17	0,2376	0,2400	0,3704	
Caso 18	0,2194	0,2200	0,3481	
Caso 20	0,1910	0,1900	0,3481	
Caso 21	0,2401	0,2400	0,3481	
Caso 23	0,2069	0,2100	0,3481	
Caso 24	0,2586	0,2600	0,3481	
Caso 26	0,2227	0,2200	0,3481	

Tabla 44. Grupo B2 con continuidad del aislamiento por el exterior con relación 0,5 del aislamiento. Fuente: elaboración propia.

Caso	Ψ_i W/(m·K)	Ψ_i redon W/(m·K)	U W/(m ² ·K)	
Caso 10	0,3221	0,3200	0,3704	
Caso 13	0,3469	0,3500	0,3704	
Caso 16	0,3617	0,3600	0,3704	
Caso 19	0,2931	0,2900	0,3481	
Caso 22	0,3203	0,3200	0,3481	
Caso 25	0,3393	0,3400	0,3481	

Dentro del Grupo C (Tabla 37, p. 132) se observa que se puede diferenciar entre detalles en los que no se produce el forrado del pilar Grupo C1 (Tabla 45) y los que se produce el forrado del pilar Grupo C2 (Tabla 46).

Tabla 45. Grupo C1 tipología SATE sin forrado del pilar. Fuente: elaboración propia.

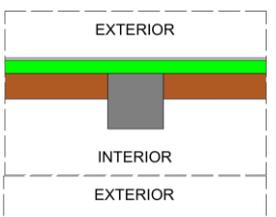
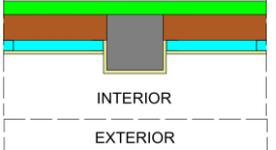
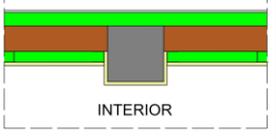
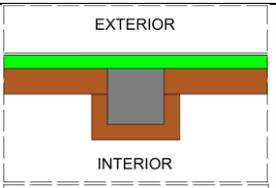
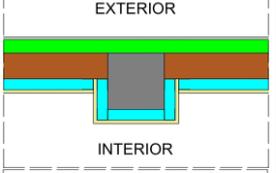
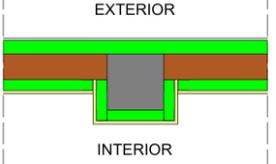
Caso	Ψ_i W/(m·K)	Ψ_i redon W/(m·K)	U W/(m ² ·K)	
Caso 1	0,1225	0,1200	0,3704	
Caso 5	0,1222	0,1200	0,3481	
Caso 6	0,1406	0,1400	0,3481	

Tabla 46. Grupo C2 tipología fachada SATE y con forrado del pilar. Fuente: elaboración propia.

Caso	Ψ_i W/(m·K)	Ψ_i redon W/(m·K)	U W/(m ² ·K)	
Caso 2	0,1699	0,1700	0,3704	
Caso 3	0,1539	0,1500	0,3704	
Caso 4	0,1514	0,1500	0,3704	

Por último, en el grupo D (Tabla 40, p. 133) se observa que se puede diferenciar entre detalles en los que no se produce el forrado del pilar Grupo D1 (Tabla 47) y los que se produce el forrado del pilar Grupo D2 (Tabla 48).

Tabla 47. Grupo D1 con discontinuidad del aislamiento y sin forrado. Fuente: elaboración propia.

Caso	Ψ_i W/(m·K)	Ψ_i redon W/(m·K)	U W/(m ² ·K)	
Caso 27	0,9303	0,9300	0,3704	
Caso 29	0,8697	0,8700	0,3704	
Caso 31	0,7480	0,7500	0,3704	
Caso 33	0,7649	0,7600	0,3481	
Caso 35	0,8204	0,8200	0,3481	
Caso 37	0,7242	0,7200	0,3481	

Tabla 48. Grupo D2 con discontinuidad del aislamiento y con forrado. Fuente: elaboración propia.

Caso	Ψ_i W/(m·K)	Ψ_i redon W/(m·K)	U W/(m ² ·K)	
Caso 28	0,8011	0,8000	0,3704	
Caso 30	0,7437	0,7400	0,3704	
Caso 32	0,6719	0,6700	0,3704	
Caso 34	0,7440	0,7400	0,3481	
Caso 36	0,7028	0,7000	0,3481	
Caso 38	0,6475	0,6500	0,3481	

Una vez hecha esta clasificación en función de los valores obtenidos para espesores de 6 cm y conductividad de 0,029 [W/(m·K)] en el aislamiento térmico, para comprobar que es aplicable al resto de espesores y conductividades térmicas se ha seleccionado uno de los grupos, en concreto el de aislamiento discontinuo, Grupo D1, y se han comparado los valores obtenidos para este espesor y transmitancia con otros espesores y transmitancias, observándose que existía un aumento o una disminución en el valor del puente térmico, pero la relación entre los diferentes casos se mantenía.

En la Tabla 49 se puede observar la comparativa de valores del Grupo D1, el Caso 27 para conductividad 0,029 [W/(m·K)] tiene los valores de transmitancia térmica lineal más elevados, y esto se mantiene para las diferentes transmitancias estudiadas, mientras que el Caso 37 tiene los valores menores y se mantiene para todas las transmitancias.

Tabla 49. Valores transmitancia térmica lineal de las diferentes conductividades térmicas para la comprobación de la clasificación realizada. Fuente: elaboración propia.

Espesor 6 cm	0,029 W/(m·K)	0,032 W/(m·K)	0,034 W/(m·K)	0,036 W/(m·K)	0,040 W/(m·K)
	Ψ_i W/(m·K)	Ψ_i W/(m·K)	Ψ_i W/(m·K)	Ψ_i W/(m·K)	Ψ_i W/(m·K)
Caso 27	0,9303	0,9247	0,9212	0,9179	0,9118
Caso 29	0,8697	0,8646	0,8614	0,8584	0,8528
Caso 31	0,7480	0,7434	0,7405	0,7378	0,7327
Caso 33	0,7649	0,7603	0,7576	0,7548	0,7498
Caso 35	0,8204	0,8159	0,8131	0,8103	0,8054
Caso 37	0,7242	0,7198	0,7171	0,7144	0,7097

En la Tabla 50 se hace la comparativa de valores para los diferentes espesores, esta vez con los valores del Grupo D2.

Tabla 50. Valores transmitancia térmica lineal de los diferentes espesores para la comprobación de la clasificación realizada. Fuente: elaboración propia.

Conductividad 0,029 W/(m·K)	6 cm	8 cm	10 cm	12 cm	14 cm
	Ψ_i W/(m·K)	Ψ_i W/(m·K)	Ψ_i W/(m·K)	Ψ_i W/(m·K)	Ψ_i W/(m·K)
Caso 28	0,8011	0,7641	0,7258	0,6440	0,4354
Caso 30	0,7437	0,7174	0,6907	0,6639	0,6369
Caso 32	0,6719	0,6532	0,6340	0,6146	0,5951
Caso 34	0,7440	0,7049	0,4569	0,4280	0,4262
Caso 36	0,7028	0,6778	0,6518	0,6249	0,5952
Caso 38	0,6475	0,6296	0,6106	0,5912	0,5718