

Artículo Técnico

Anticipando el Edificio de Cero Emisiones con Termoarcilla y certificación Passivhaus

Martín Amado Pousa. Arquitecto técnico, ingeniero civil, diseñador y certificador Passivhaus

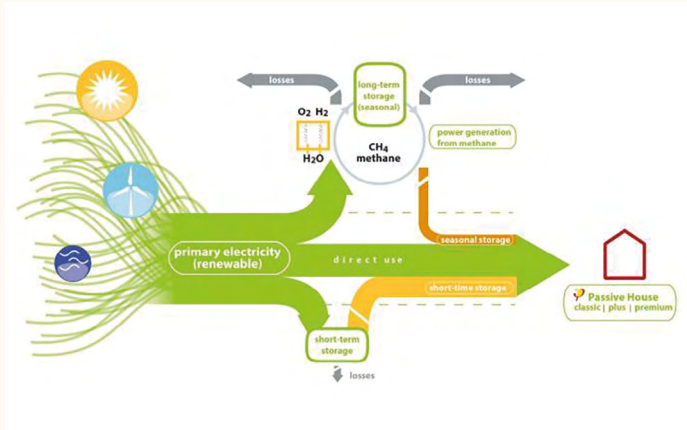


Figura 1. Diagrama de flujo energético desde el suministro renovable hasta la energía consumida en el edificio, incluyendo sistemas de almacenamiento. Fuente: Passivhaus Institut.

La energía del futuro será en su mayor parte de origen renovable, lo cual implica diferencias significativas con respecto a los sistemas energéticos convencionales debido a la naturaleza variable, fluctuante y dependiente de factores externos incontrolables como la meteorología. El nuevo Edificio de Cero Emisiones, anticipado por los edificios de más alta eficiencia energética bajo la certificación Passivhaus Plus y Premium, asegura un futuro en la edificación de consumo prácticamente nulo y la integración de energías renovables “in situ”. Estos edificios son y serán el modelo de referencia para alcanzar la plena descarbonización del sector y, además, servirán para dotar al sistema energético de una mayor flexibilidad.

Producto: Termoarcilla

Dirigido a: Projectistas

Contenidos: Diseño

Evolución del marco normativo europeo

El marco normativo actual en materia de eficiencia energética de los edificios se desarrolla en un contexto internacional marcado por la lucha contra el cambio climático. En este contexto, el Acuerdo de París, adoptado en diciembre de 2015 en el marco de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, establece como objetivo mantener el aumento de la temperatura media mundial muy por debajo de 2 °C con respecto a los niveles preindustriales y proseguir los esfuerzos para limitar dicho aumento a 1,5 °C, con el fin de reducir de forma significativa los riesgos y los efectos del cambio climático.

El Acuerdo de París plantea asimismo la necesidad de alcanzar un equilibrio entre las emisiones antropógenas por las fuentes y la absorción por los sumideros de gases de efecto invernadero en la segunda mitad del siglo, lo que implica una transformación profunda de los sistemas energéticos. En este proceso, el sector de la edificación adquiere un papel central, tal y como se refleja en el desarrollo normativo posterior de la Unión Europea alineado con dichos compromisos internacionales.

En coherencia con este marco, la Directiva (UE) 2024/1275 señala que los edificios representan el 40 % del consumo final de energía en la Unión y el 36 % de las emisiones de gases de efecto invernadero relacionadas con la energía, lo que pone de manifiesto la relevancia del sector de la edificación en la estrategia europea de descarbonización.

1. La Directiva UE 2024/1275 y el Código Técnico de la Edificación

La Directiva (UE) 2024/1275, relativa a la eficiencia energética de los edificios (refundición), introduce un cambio de enfoque sustancial en el marco normativo europeo al incorporar, por primera vez, el análisis del ciclo de vida completo de los edificios. Frente a las directivas anteriores, centradas fundamentalmente en la regulación del consumo energético y las emisiones en la fase de uso, la nueva directiva amplía el ámbito de aplicación a las emisiones de gases de efecto invernadero a lo largo de todo el ciclo de vida, incluyendo las emisiones incorporadas en los productos de construcción, mediante la declaración del potencial de calentamiento global (PCG o GWP).

El Análisis de Ciclo de Vida completo del nuevo Edificio de Cero Emisiones, junto con la definición cuantitativa del edificio de cero emisiones y de la clase energética A+, supone un cambio de paradigma para el sector de la edificación, al consolidar un enfoque basado en la minimización de la demanda energética, la eliminación de las emisiones operativas y la optimización del comportamiento del edificio a lo largo de todo su ciclo de vida. En este contexto, el estándar Passivhaus, se consolida como una referencia para la aplicación práctica de la Directiva (UE) 2024/1275 y como una herramienta técnica adecuada y contrastada para la transición hacia el Edificio de Cero Emisiones.

En el borrador del Real Decreto por el que se modifica el Código Técnico de la Edificación, destinado a la transposición parcial de la Directiva (UE) 2024/1275, se incorpora por primera vez en el marco normativo español la definición del Edificio de Cero Emisiones.

El estándar Passivhaus

El concepto Passivhaus surge a finales de la década de 1980 a partir de los trabajos desarrollados por Wolfgang Feist y Bo Adamson, en el contexto de una estancia de investigación de Feist en la Universidad de Lund, en Suecia. Como resultado de estas investigaciones, en 1990 se construye en Darmstadt (Alemania) el primer prototipo residencial que aplica de forma sistemática los principios del edificio Passivhaus: la denominada casa pasiva de Kranichstein.

A partir del desarrollo de esta investigación y la publicación de los resultados en su tesis, el Dr Feist fundó el instituto Passivhaus en 1996 manteniendo la monitorización del proyecto prototipo de viviendas.

El instituto Passivhaus, centro de investigación independiente formado por un equipo multidisciplinar de profesionales (físicos, arquitectos e ingenieros) desarrolló los criterios del estándar con el objetivo de establecer las bases de una edificación de muy alta eficiencia energética, reduciendo al máximo el consumo en la fase de uso y buscando una rentabilidad óptima en el coste de ciclo de vida del edificio.

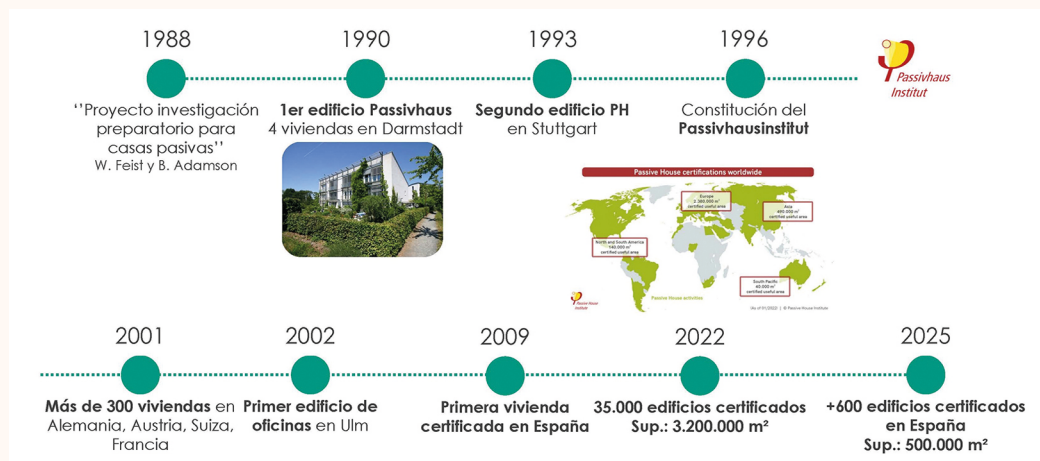


Figura 2. Historia del estándar Passivhaus.

El objetivo principal de la certificación Passivhaus es obtener elevados niveles de confort, higiene y calidad del aire en el interior de los edificios manteniendo un consumo energético muy bajo, contribuyendo así a un importante ahorro para el consumidor y evitando la "hipoteca energética" debido al continuo incremento del precio de la energía.

Los criterios de diseño de un edificio Passivhaus se basan en una adecuada combinación y optimización de los siguientes aspectos fundamentales:

- Criterios pasivos tradicionales: compacidad, orientación adecuada al máximo aprovechamiento de la energía y la luz natural, inercia térmica, protección solar, reflectividad solar y estrategias de ventilación para la refrigeración pasiva.
- Nivel de aislamiento térmico adecuado al entorno climático con ventanas de altas prestaciones y minimización de los puentes térmicos.
- Elevado nivel de hermeticidad combinado con un sistema de ventilación de doble flujo con recuperación de calor.
- Adecuado dimensionamiento de los sistemas de climatización para garantizar un elevado nivel de confort térmico y acústico.
- Modelización energética con la herramienta de simulación PHPP para la justificación de los criterios de certificación:
 - Limitación de la demanda de calefacción
 - Limitación de la frecuencia de sobrecalentamiento (25 °C)
 - Limitación de la demanda de refrigeración
 - Limitación de la hermeticidad
 - Limitación de la demanda de energía primaria renovable*
 - Generación de energía primaria renovable para las certificaciones Plus y Premium

		Criterios ¹		Criterios alternativos ²	
Calefacción					
Demanda de calefacción	[kWh/(m²a)]	≤	15	-	
Carga de calefacción ³	[W/m²]	≤	-	10	
Refrigeración					
Demanda refrigeración + deshum.	[kWh/(m²a)]	≤	15 + Asignación variable ⁴		
Hermeticidad					
Resultado ensayo de presión n ₅₀	[1/h]	≤	0,6		
Energía Primaria Renovable (PER)⁵					
			Classic	Plus	Premium
Demanda PER ⁶	[kWh/(m²a)]	≤	60	45	30
Generación de energía renovable ⁷ (con referencia a la huella proyectada del edificio)	[kWh/(m²a)]	≥	-	60	120
			±15 kWh/(m²a) desviación respecto a los criterios... ...con compensación de la desviación mostrada arriba mediante diferentes valores de generación ⁸		

Figura 3. Criterios de certificación Passivhaus. Fuente: Passivhaus Institut.

Actualmente existe un parque de más de 600 edificios certificados Passivhaus en España que suponen un total de medio millón de m² construidos bajo el estándar. Además de un gran número de viviendas unifamiliares, ya existe un parque de edificios multi residenciales y edificios terciarios de uso dotacional, educativo y sanitario certificados Passivhaus.

Cada vez son más los edificios que se proyectan en España bajo los parámetros del estándar de construcción Passivhaus o Casa Pasiva. El estándar Passivhaus ha pasado a ser el estándar de referencia para aquellos promotores, tanto públicos como privados, que pretenden dar un paso más en la edificación de Edificios de Consumo de energía Casi Nulo (ECCN) y que ya están preparados para la transición hacia el Edificio de Cero Emisiones.

Las certificaciones Passivhaus Plus y Premium, que establecen unos valores de demanda energética y consumo de energía primaria muy reducidos y la obligatoriedad de la producción de energía renovable "in situ", anticipan el nuevo Edificio de Cero Emisiones y la clase energética A+ establecida en la nueva Directiva UE 2024/1275. De esta forma, la certificación Passivhaus servirá como modelo de referencia para alcanzar la plena descarbonización del sector de la edificación.

La certificación Passivhaus de sistemas constructivos

La certificación Passivhaus de edificios mantiene unos criterios de limitación de la demanda energética en todos los climas. Sin embargo, las estrategias para llegar a las limitaciones de demanda establecidas por el estándar Passivhaus son las que se han de modificar en función del clima, tipología de edificio, condiciones de uso, etc.

Para facilitar el diseño y la construcción de edificios Passivhaus con la garantía de que los sistemas constructivos cumplen con las exigencias de eficiencia energética adecuadas para cada región, el PHI desarrolló el proceso de certificación de sistemas constructivos.

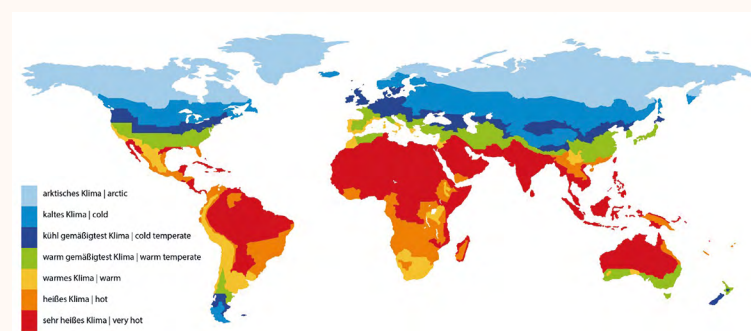


Figura 4. Asignación de regiones con iguales requisitos para la certificación Passivhaus de sistemas constructivos, basada en estudios del PHI. Fuente: Passivhaus Institut.

A continuación, se muestran los requisitos necesarios para la certificación Passivhaus de sistemas constructivos en función de la zona climática.

Se marcan en verde y amarillo los requisitos necesarios para la certificación de sistemas constructivos en las zonas de clima cálido y templado del sur de Europa y de la península Ibérica y en rojo los requisitos que se exigen en todas las zonas climáticas:

Zona climática	Criterio de higiene ^a	Criterio de confort	Criterios de eficiencia			Criterios de humedad ^d	
	$f_{Rsi} = 0,25 \text{ m}^2\text{K/W} \geq^3$	Valor-U de la ventana instalada ¹ $\leq$	Valor-U del elemento constructivo exterior $U_{opaco} \cdot f_{R,PHI}^2 \leq$	Detalles estrictamente opacos $f_{Rsi} = 0,25 \text{ m}^2\text{K/W} \geq^3$	Ausencia de puentes térmicos $\Psi_a \leq^4$	Condensación	Límite Ma según EN-ISO 13788 $\leq$
	[-]	[W/(m²K)]	[W/(m²K)]	[-]	[W/(mK)]	[-]	[g/m²]
1 Ártica	0.80	0.45 (0.35)	0.09	0.90	0.010 ^b	La condensación debe evaporarse completamente al final de 12 meses	200 ^c
2 Fría	0.75	0.65 (0.52)	0.12	0.88			
3 Frio - templado	0.70	0.85 (0.70)	0.15	0.86			
4 Cálido - templado	0.65	1.05 (0.90)	0.25	0.82			
5 Cálido	0.55	1.25 (1.10)	0.50	0.74			
6 Caluroso	Ninguno	1.25 (1.10)	0.50	0.74			
7 Muy caluroso	Ninguno	1.05 (0.90)	0.25	0.82			

1. Aplicable a ventanas verticales con un tamaño de ensayo de 1,23 × 1,48 m. Los criterios para los componentes constructivos transparentes pueden consultarse en los criterios de certificación correspondientes. El valor entre paréntesis corresponde al acristalamiento de referencia.
2. fR, PHI - Factor de reducción: siempre 1. Excepción: zonas en contacto con el terreno y hacia sótanos no calefactados en las zonas climáticas 1-4: 0,6. Por ejemplo, en la zona climática 3 el criterio de valor U pasa a ser 0,25 W/(m²·K).
3. fRsi = 0,25 m²K/W ≥ - El 0,25 m²K/W en el índice significa que la resistencia térmica superficial interior que debe utilizarse en el cálculo es de 0,25 m²K/W.
4. Coeficiente de pérdida por puente térmico basado en dimensiones exteriores y longitud. Determinadas construcciones específicas, como aristas interiores, quedan exentas de este criterio.
5. Los puentes térmicos geométricos, en los que el espesor del aislamiento alrededor del encuentro es continuo pero el método de cálculo arroja un valor $\Psi > 0,010 \text{ W/(m·K)}$, quedan exentos de este criterio.
6. Estos criterios se basan en el método de Glaser y permiten evaluar la probabilidad de aparición de condensaciones intersticiales durante el invierno. Cuando no se cumplan estos criterios, podrá realizarse una simulación dinámica según EN 15026. Es responsabilidad del proyectista asegurar que se realicen las evaluaciones adecuadas.
7. El límite Ma (contenido máximo de humedad acumulada) se basa en la ISO 13788 y refleja la cantidad máxima de condensado admisible para evitar el escurrimiento de agua líquida desde superficies estancas.
8. Para umbrales de puertas, se aplica el criterio de punto de rocío conforme al apartado 6.

La certificación de componentes Passivhaus, desarrollada por el Passivhaus Institut (PHI), puede entenderse como una profundización prestacional de los criterios de cálculo y verificación establecidos en el Documento Básico DB-HE y en sus Documentos de Apoyo, especialmente en lo relativo a la caracterización térmica de la envolvente, el tratamiento de los puentes térmicos y el comportamiento higratérmico de los cerramientos. El CTE, además de establecer las prestaciones energéticas mínimas del edificio, define procedimientos específicos para la comprobación de la limitación de condensaciones superficiales e intersticiales. Frente a este enfoque reglamentario, orientado a garantizar un umbral mínimo de cumplimiento, la certificación Passivhaus de componentes evalúa de forma más detallada y exigente el comportamiento higratérmico de los sistemas constructivos, proporcionando valores característicos robustos y verificados, adecuados para edificios de muy alta eficiencia energética.

El DB-HE 1 establece unos valores límite de transmitancia térmica (U) para cada elemento perteneciente a la envolvente térmica en función de la severidad climática de invierno:

Tabla 3.1.1.a - HE1 Valores límite de transmitancia térmica, U _{lim} [W/m²·K]							
Elemento	Zona climática de invierno						
	α	A	B	C	D	E	
Muros y suelos en contacto con el aire exterior (Us, Um)	0,80	0,70	0,56	0,49	0,41	0,37	
Cubiertas en contacto con el aire exterior (Uc)	0,55	0,50	0,44	0,40	0,35	0,33	
Muros, suelos y cubiertas en contacto con espacios no habitables o con el terreno (U _T)	0,90	0,80	0,75	0,70	0,65	0,59	
Medianerías o particiones interiores pertenecientes a la envolvente térmica (U _{MO})							
Huecos (conjunto de marco, vidrio y, en su caso, cajón de persiana) (U _h)*	3,2	2,7	2,3	2,1	1,8	1,80	
Puertas con superficie semitransparente igual o inferior al 50%				5,7			

*Los huecos con uso de escape en unidades de uso con actividad comercial pueden incrementar el valor de U_h en un 50%.

Figura 5. Tabla 3.1.1.a del DB-HE 1 del CTE.

Comparando esta tabla con la tabla de criterios de certificación Passivhaus de sistemas constructivos se aprecian las siguientes diferencias:

- U_S, U_M: Los valores de transmitancia para la certificación Passivhaus son de 0,50 W/m²·K en clima cálido y de 0,25 W/m²·K en clima cálido - templado. Los valores son ligeramente más altos en el CTE para los climas cálido (α, A y B) y para los climas cálido - templados (C, D y E).
- U_C: Los valores de transmitancia para la certificación Passivhaus son de 0,50 W/m²·K en clima cálido y de 0,25 W/m²·K en clima cálido - templado. Los valores son ligeramente más altos en el CTE para los climas cálido (α, A y B) y para los climas cálido - templados (C, D y E).
- U_T, U_{MO}: Los valores de transmitancia par la certificación Passivhaus son de 0,50 W/m²·K (factor de reducción de 0,6) en clima cálido y de 0,35 W/m²·K en clima cálido - templado. Los valores son ligeramente más altos en el CTE para los climas cálido (α, A y B) y para los climas cálido - templados (C, D y E).
- U_h: Los valores de transmitancia para la certificación Passivhaus son de 1,25 W/m²·K en clima cálido y de 1,05 W/m²·K en clima cálido - templado. Los valores son sensiblemente más altos en el CTE para los climas cálido (α, A y B) y para los climas cálido - templados (C, D y E).
- La exigencia para la certificación Passivhaus de los elementos semitransparentes de huecos de ventana es diferencial con respecto a los niveles límite establecidos en el DB HE del CTE. Uno de los principios básicos del estándar Passivhaus desde sus inicios es minimizar las pérdidas energéticas y garantizar el confort interior a través de la eliminación de asimetrías térmicas en la envolvente mediante un nivel de aislamiento térmico adecuado al entorno climático con ventanas de altas prestaciones y la minimización de los puentes térmicos.

Si nos vamos al Anejo E Valores orientativos de transmitancia del DB-HE del CTE nos encontramos con la siguiente tabla:

1 La tabla a-Anejo E aporta valores orientativos de los parámetros característicos de la *envolvente térmica* que pueden resultar útiles para el predimensionado de soluciones constructivas de edificios de *uso residencial privado*, para el cumplimiento de las condiciones establecidas para el *coeficiente global de transmisión de calor* a través de la envolvente (apartado 3.1.1 – HE1):

Tabla a-Anejo E. Transmitancia térmica del elemento, U [W/m²·K]		Zona Climática de invierno					
		α	A	B	C	D	E
Muros y suelos en contacto con el aire exterior, U _M , U _S		0,56	0,50	0,38	0,29	0,27	0,23
Cubiertas en contacto con el aire exterior, U _C		0,50	0,44	0,33	0,23	0,22	0,19
Elementos en contacto con espacios no habitables o con el terreno, U _T		0,80	0,80	0,69	0,48	0,48	0,48
Huecos (conjunto de marco, vidrio y, en su caso, cajón de persiana), U _h		2,7	2,7	2,0	2,0	1,6	1,5

2 Los valores anteriores presuponen un correcto tratamiento de los *puentes térmicos*.

Figura 6. Tabla a-Anejo E del DB-HE del CTE.

Los valores de esta tabla se asemejan mucho más a los valores de la certificación Passivhaus de sistemas constructivos con la excepción de los valores establecidos para los huecos de ventana.

El DB-HE del CTE y su documento de apoyo DA DB-HE / 3 Puentes térmicos no limitan de ninguna forma el valor Ψ (PSI) de transmitancia térmica lineal. La única limitación del DB-HE es la verificación de la no formación de condensaciones superficiales en los puentes térmicos y aporta un atlas de puentes térmicos que contiene indicaciones cualitativas sobre el riesgo de formación de moho para distintas soluciones constructivas.

Sin embargo, para la certificación Passivhaus, es necesario aportar el cálculo del coeficiente de transmitancia térmica lineal Ψ (PSI) de los puentes térmicos, así como el cálculo del factor de temperatura superficial fRsi, obtenidos a partir de la modelización detallada del flujo de calor mediante métodos de elementos finitos del detalle constructivo, con el fin de verificar el cumplimiento de los valores límite establecidos.

La certificación Passivhaus de sistemas constructivos promueve la certificación libre de puentes térmicos y establece un valor Ψ (PSI) límite de transmitancia térmica lineal de 0,01 W/m·K.

La tabla 1 del documento de apoyo DA DB-HE / 2 Comprobación de limitación de condensaciones superficiales e intersticiales en los cerramientos establece los valores $f_{Rsi, min}$ mínimos para cada zona climática que verifican la limitación de condensaciones superficiales.

Comparando esta tabla con la tabla de criterios de certificación Passivhaus de sistemas constructivos se aprecia que los valores límite $f_{Rsi, min}$ para la certificación Passivhaus son de 0,55 en clima cálido y de 0,65 en clima cálido - templado. Los valores son ligeramente más bajos en el CTE para los climas cálidos (A, B y C) y para los climas cálido - templados (D y E). La comparación se realiza para un uso residencial (clase de higrometría 3 o inferior a 3).

Tabla 1 Factor de temperatura de la superficie interior mínimo $f_{Rsi, min}$						
Categoría del espacio	Zona climática de invierno					
	A	B	C	D	E	
Clase de higrometría 5	0,70	0,80	0,80	0,80	0,90	0,90
Clase de higrometría 4	0,56	0,66	0,66	0,69	0,75	0,78
Clase de higrometría 3 o inferior a 3	0,42	0,50	0,52	0,56	0,61	0,64

Figura 7. Tabla 1 del DA DB-HE / 2.

Sin embargo, la certificación Passivhaus establece unos criterios de factor $f_{Rsi, min}$ más estrictos para los detalles constructivos entre elementos opacos (0,74 en clima cálido y 0,82 en clima cálido - templado). Estos criterios más estrictos garantizan la eliminación del riesgo de formación de moho en los encuentros constructivos con coeficientes de convección de aire más bajos y, por lo tanto, mayor riesgo de temperaturas superficiales más reducidas. La certificación Passivhaus garantiza la no generación de patologías constructivas en todos los detalles constructivos con unos requisitos más exigentes que los establecidos en el DB HE del CTE.

(*) El marco conceptual y los fundamentos teóricos para el correcto entendimiento de los valores de cálculo nombrados en este artículo se encuentran en los siguientes documentos y sus normativas UNE-EN ISO de referencia:

- DA DB-HE / 1 Cálculo de parámetros característicos de la envolvente
- DA DB-HE / 2 Comprobación de limitación de condensaciones superficiales e intersticiales en los cerramientos
- DA DB-HE / 3 Puentes térmicos

También se recomienda visitar el Artículo Técnico “Análisis de puentes térmicos de fachada autoportante de ladrillo caravista, ESTRUCTURA, para edificios ECCN y Passivhaus” redactado por Jesús Ángel Duque y Víctor Alesanco en el buscador de artículos técnicos de conarquitectura:

<https://conarquitectura.es/art-tec/analisis-de-puentes-termicos-de-fachada-autoportante-de-ladrillo-caravista-estructura-para-edificios-eccn-y-passivhaus/>

Sistemas constructivos de fachada certificados Passivhaus en España

Actualmente existen en España 15 sistemas constructivos certificados Passivhaus pero únicamente los sistemas certificados por Hispalys (sistema ESTRUCTURA de fachada autoportante de ladrillo caravista) y por el Consorcio Termoarcilla constituyen los sistemas constructivos con un tipo de construcción maciza de alta inercia



Figura 9. Centro Sociocultural El Ensanche. INCOSA, Parra Arquitectos. Fotografía: Imagen Subliminal.

térmica. El resto de sistemas de fachada certificados, con la excepción de dos sistemas macizos prefabricados, son sistemas constructivos ligeros de estructura metálica o de estructura de madera.

Sistema constructivo de fachada Termoarcilla® SATE

El documento del certificado Passivhaus del sistema está disponible en la página web del PHI:

<https://database.passivehouse.com/es/components/certificate/download/2339/es>

Envolvente opaca del edificio

El sistema está compuesto por un cerramiento de bloques de Termoarcilla® con enlucido de yeso de 15 mm de espesor en la cara interior, un sistema de aislamiento térmico por el exterior (SATE) de 140 mm de espesor, y un trasdosado de placas de yeso laminado con una cámara de aire de 60 mm de espesor. El cerramiento de Termoarcilla® se conforma mediante la colocación de los bloques con juntas horizontales de mortero. El sistema de aislamiento térmico por el exterior se resuelve con paneles de EPS (0,035 W/(mK)) adheridos y fijados mecánicamente al cerramiento, y un revestimiento multicapa de mortero con una malla de refuerzo. El trasdosado interior se resuelve con una estructura de perfiles de acero galvanizado sobre la que se atornillan las placas de yeso laminado. El sistema ha sido evaluado según los criterios del Instituto Passivhaus para sistemas constructivos opacos, y ha sido certificado como adecuado en proyectos Passivhaus para las zonas climáticas cálida-templada y cálida.

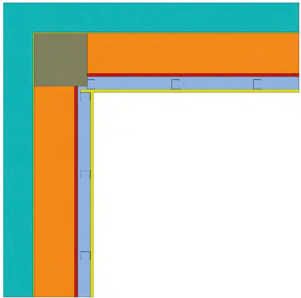


Figura 10. Sistema constructivo de fachada Termoarcilla® SATE.

Zonas climáticas		Categoría		Tipo de construcción		Ubicación / disponibilidad	
Sistema constructivo		Macizo		Spain			
deshabilitar filtros		filtro					
Buscar		Categoría		Tipo de construcción		Zonas climáticas	
Fabricantes		Componente				Ubicación / disponibilidad	
Estructura		Sistema constructivo		Macizo		Cálida templada	
Hispalys						ES FR NL GB	
jun 2024							
Termoarcilla® Fachada SATE		Sistema constructivo		Macizo		Cálida templada	
Consorcio Termoarcilla						ES	
jun 2024							
Termoarcilla® Fachada ventilada		Sistema constructivo		Macizo		Cálida templada	
Consorcio Termoarcilla						ES	
jun 2024							

Figura 8. Buscador de sistemas certificados Passivhaus en la web del PHI.

En el proceso de certificación Passivhaus, se ha verificado mediante un cálculo de flujo de calor por elementos finitos la transmitancia térmica de la solución de fachada incluyendo el efecto de las juntas constructivas entre la Termoarcilla y el impacto de la subestructura metálica autoportante del trasdosado interior (Figs. 11 y 12).

Se han modelado todos los encuentros constructivos de la fachada con los elementos opacos de la envolvente para la verificación de los valores límite de transmitancia térmica lineal y la limitación de formación de moho mediante el factor f_{Rsi} .

Como ejemplo de cálculo detallado de los encuentros constructivos con la envolvente opaca, se exponen los cálculos realizados para el encuentro constructivo del frente de forjado (Fig. 13).

El valor Ψ de cálculo de este detalle constructivo es de 0,013 W/m·K ($> 0,01$ W/m·K). A pesar de que el detalle no cumple estrictamente el criterio de certificación se ha validado para la certificación Passivhaus del sistema constructivo debido a la excepción de que “Los puentes térmicos geométricos, en los que el espesor del aislamiento alrededor del encuentro es continuo pero el método de cálculo arroja un valor $\Psi > 0,010$ W/(m·K), quedan exentos de este criterio”.

Esto demuestra que la certificación Passivhaus no es una certificación rígida, sino que se busca la optimización de las prestaciones térmicas, higiénicas y de confort de los sistemas constructivos que se someten a este proceso (Fig. 14).

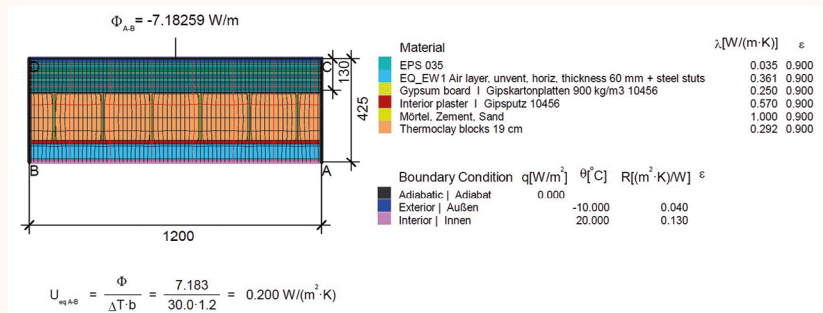


Figura 11. Cálculo de la transmitancia térmica de la sección vertical de la fachada.

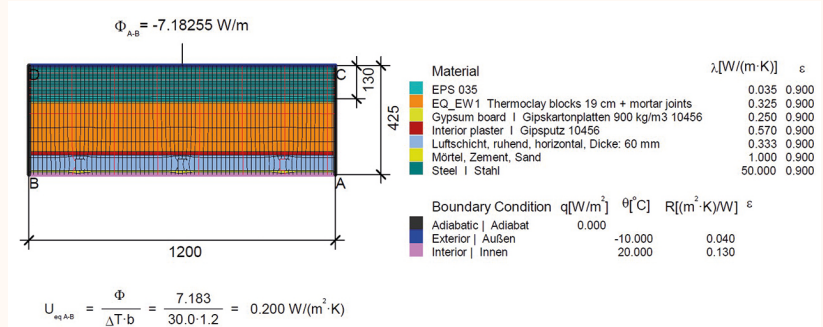


Figura 12. Cálculo de la transmitancia térmica de la sección horizontal de la fachada.

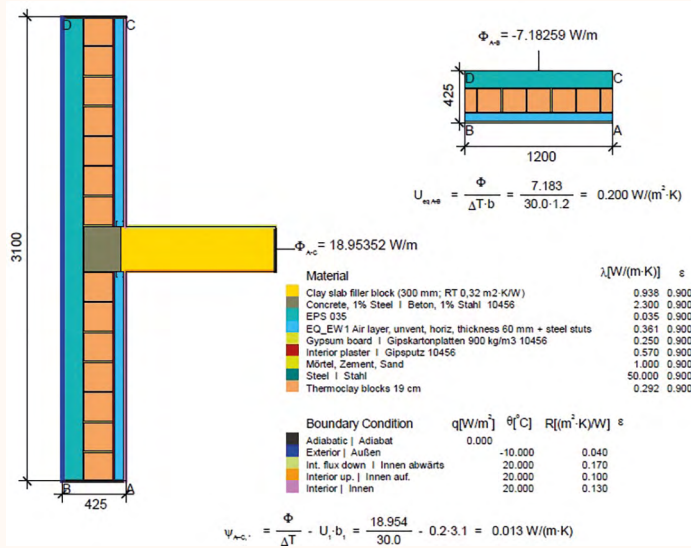


Figura 13. Cálculo del valor Ψ (PSI) de transmitancia térmica lineal del puente térmico del frente de forjado.

El factor f_{Rsi} del detalle constructivo es de 0,941 ($>$ factor mínimo de certificación de 0,82 para clima cálido – templado). Esto garantiza la eliminación del riesgo de formación de moho en el encuentro analizado.

Ventanas

Para los cálculos de la certificación se utilizó una ventana estándar Passivhaus ($U_w = 1,00$ W/(m²·K) con $U_g = 0,90$ W/(m²·K)). El valor U global de la ventana instalada (U_w , inst) para una ventana de tamaño estándar (1,23 m de ancho y 1,48 m de alto) no debe ser superior a 0,05 W/(m²·K) al valor U_w para garantizar el confort de los ocupantes. Este criterio se cumple con una solución de instalación de ventana posicionada en el plano del aislamiento térmico exterior. Esta solución constructiva se resuelve con un perfil de madera de apoyo en el alféizar de la ventana y anclajes de perfiles L metálicos en las jambas y el dintel.

Para la verificación de los criterios confort para la certificación se analizaron diferentes posiciones de la ventana con respecto al aislamiento de la fachada hasta llegar a una solución energéticamente eficiente y que fuese constructiva y técnicamente viable (Fig. 15).

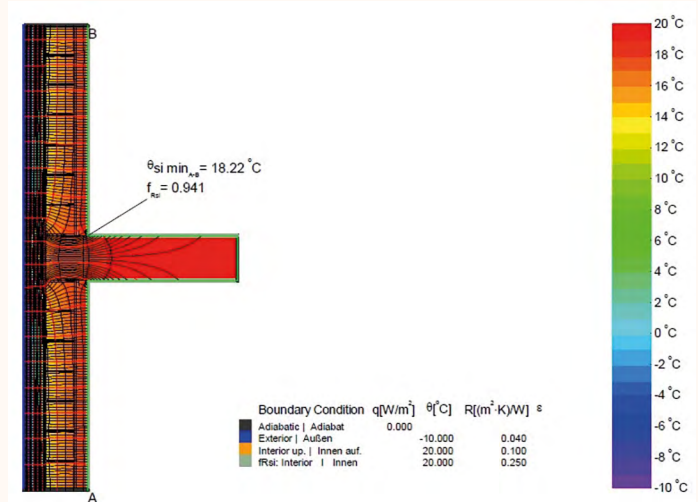


Figura 14. Cálculo detallado de la temperatura superficial interior mínima y del factor f_{Rsi} del detalle constructivo del frente de forjado.

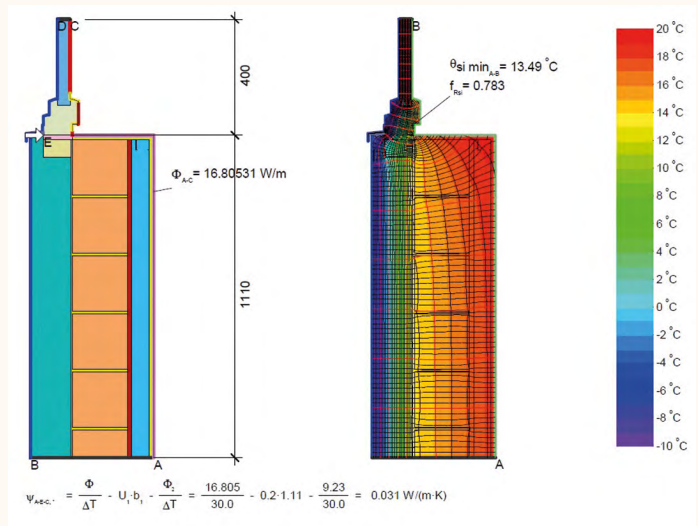


Figura 15. Cálculo detallado del valor Ψ (PSI) de transmitancia térmica lineal, de la temperatura superficial interior mínima y del factor f_{Rsi} del encuentro de instalación de ventana.

Los resultados obtenidos garantizan la eliminación del riesgo de formación de moho en el detalle de la ventana y un comportamiento energéticamente muy eficiente de la solución constructiva garantizando al mismo tiempo las condiciones de confort adecuadas. Una ventana de altas prestaciones mal instalada con respecto al aislamiento térmico puede generar temperaturas superficiales demasiado bajas que generen patologías y disconfort térmico por radiación.

Concepto de hermeticidad

La hermeticidad del sistema se resuelve de la siguiente manera: el enlucido de yeso interior funciona como capa hermética del cerramiento. Los encuentros con ventanas y puertas se resuelven con cintas especiales para hermeticidad en la cara interior, en continuidad con el enlucido de yeso. Los encuentros con el resto de elementos constructivos se resuelven con cintas especiales o soluciones de pintura hermética, manteniendo la línea de hermeticidad de fachada en el enlucido de yeso interior.

Sistema constructivo de fachada Termoarcilla® Fachada ventilada

El documento del certificado Passivhaus del sistema está disponible en la página web del PHI:

<https://database.passivehouse.com/es/components/certificate/download/2338/es>

Las soluciones constructivas adoptadas para este sistema son idénticas a las soluciones del sistema Termoarcilla® SATE con la peculiaridad de que para cumplir con los requisitos de la certificación Passivhaus, la fachada ventilada se resuelve con paneles de aislamiento de lana mineral (0,040 W/m·K) fijados mecánicamente al cerramiento con el sistema de anclaje de fachadas ventiladas FLH R de Fisher, con certificación Passivhaus.

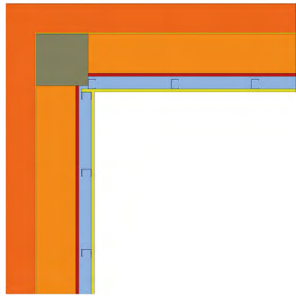


Figura 16. Sistema constructivo de fachada Termoarcilla® Fachada ventilada.

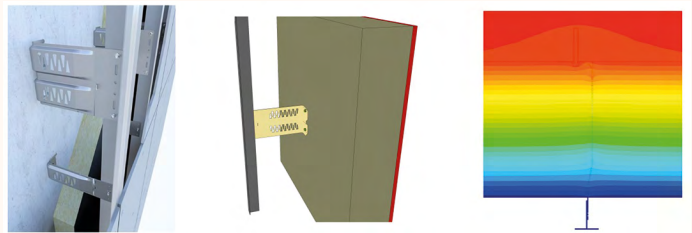


Figura 17. Imagen, modelo de cálculo 3D y mapa de isoterma del certificado Passivhaus del sistema de anclaje de fachada ventilada FLH R de Fisher.

Un anclaje de fachada ventilada convencional de aluminio dispararía los valores de transmitancia térmica globales de la fachada debido al elevado puente térmico puntual que supone. El flujo de calor adicional de un anclaje convencional de aluminio supondría un aumento de la transmitancia térmica de la fachada de aproximadamente 0,10 W/m²·K. y el flujo de calor adicional.

La transmitancia térmica media del elemento de fachada pasaría de 0,20 W/m²·K a 0,30 W/m²·K, quedando fuera de los límites de certificación Passivhaus del sistema constructivo.

$$\Phi_T = \left(\sum U_i A_i + \sum \psi_j L_j + \sum \chi_k \right) (\theta_i - \theta_e) = U_m A_T (\theta_i - \theta_e) \quad (1)$$

donde:

- Φ_T flujo de calor por conducción [W];
- U_i transmitancia térmica¹ del elemento i de la envolvente [W/m²·K], de área A_i [m²];
- ψ_j transmitancia térmica lineal del encuentro j del edificio [W/mK] y L_j la longitud de ese encuentro [m];
- χ_k transmitancia térmica del puente térmico puntual k [W/K];
- U_m transmitancia térmica media de la envolvente [W/m²·K] incluido el efecto de los puentes térmicos;
- A_T superficie total de transmisión [m²].

Figura 18. Formulación de la transmisión de calor considerando los puentes térmicos. Fuente: DA DB-HE / 3 Puentes térmicos



Figura 19. 24 viviendas públicas en Platja d'En Bossa. 08014 arquitectura. Fotografía: Pol Viladoms.

El flujo de calor adicional de un anclaje certificado Passivhaus tiene un impacto 10 veces menor en la transmitancia térmica global de la fachada, permitiendo la certificación Passivhaus del sistema constructivo.

Data sheet fischerwerke GmbH, FLH R

Manufacturer fischerwerke GmbH, Klaus-Fischer-Str.1, 72178 Waldachtal
Tel.: +49 7443 12-0
facades@fischer.de
www.fischer-international.com/en/products/facade-systems

Criteria validated based on reference facade	ΔU [W/(m²·K)]
LC V	0.009
LC VI	0.013

Figura 20. Tabla del certificado Passivhaus que acredita el impacto de los anclajes de fachada ventilada en la transmitancia térmica global en función de la carga estructural

Conclusiones

La aplicación de sistemas constructivos certificados Passivhaus garantiza su idoneidad para edificios de muy alta eficiencia energética, al ofrecer prestaciones térmicas y de confort elevadas, verificadas mediante procedimientos de cálculo exhaustivos. Asimismo, el uso de sistemas certificados Passivhaus facilita el desarrollo del proyecto, aportando al proyectista mayor seguridad técnica y proporcionando a los promotores que encuentran en la certificación Passivhaus un valor añadido, garantías de cumplimiento de los requisitos exigidos.

Adicionalmente, los sistemas de Termoarcilla, gracias a su elevada inercia térmica, contribuyen de forma significativa al amortiguamiento y desfase de la onda térmica, reduciendo las oscilaciones de temperatura interior y minimizando la demanda de calefacción y refrigeración. Esta cualidad, propia de los sistemas constructivos macizos, favorece una gestión más flexible de la demanda energética, en coherencia con la definición del Edificio de Cero Emisiones establecida en la Directiva (UE) 2024/1275.

Asimismo, cabe destacar que los sistemas constructivos de Termoarcilla permiten alcanzar de forma sencilla y robusta una elevada hermeticidad de la envolvente, cumpliendo con los requisitos exigidos por la certificación Passivhaus. Esta elevada hermeticidad, en combinación con una ventilación controlada, garantiza el control del riesgo de condensaciones y una alta calidad del aire interior sin comprometer la eficiencia energética.

(*) Para un correcto entendimiento de los conceptos de inercia térmica y hermeticidad se recomienda visitar el Artículo Técnico "Inercia térmica y hermeticidad con productos cerámicos. Conceptos y normativa sobre eficiencia energética de los edificios" redactado por Elena Santiago Monedero y Ana Ribas Sangüesa en el buscador de artículos técnicos de conarquitectura:

<https://conarquitectura.es/art-tec/inercia-termica-y-hermeticidad-con-productos-ceramicos-conceptos-y-normativa-sobre-eficiencia-energetica-de-los-edificios/>