

Ajuste de la conductividad térmica de diseño fijada por el código técnico de la edificación para materiales de fachada



Adjusting the design thermal conductivity considered by the spanish building technical code for façade materials



José María Pérez-Bella¹, Javier Domínguez-Hernández¹, Enrique Cano-Suñén¹, Juan José del Coz-Díaz², Beatriz Rodríguez Soria³

¹ Universidad de Zaragoza. Escuela de Ingeniería y Arquitectura. Área Ingeniería de la Construcción. c/ María de Luna, s/n – 50018 Zaragoza.

² Universidad de Oviedo. Escuela Politécnica de Ingeniería de Gijón. Dpto. Ingeniería de la Construcción. Edificio departamental Viesques, 7 – 33204 Gijón.

³ Centros Universitarios de la Defensa. CUD Zaragoza. Academia General Militar. Ctra. Huesca, s/n – 50090 Zaragoza.

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8005> | Recibido: 21/03/2016 • Evaluado: 30/03/2016 • Aceptado: 25/06/2016

ABSTRACT

• The Spanish Technical Building Code establishes a temperature of 10°C and an equilibrium moisture content with a relative humidity of 50% and 23°C, respectively, as reference to determine the design thermal values of construction materials. However, these reference values are not consistent with the actual climatic conditions of the country, resulting in optimistic designs of the building thermal envelopes and higher energy consumptions than expected by design.

This article analyses these differences, reviews the weaknesses of the Spanish Code in this area, and uses a recently developed procedure to determine the actual thermal conductivity of façade materials with similar precision and less calculation effort that the standard UNE-EN ISO 10456. All this would contribute to improve the thermal design currently defined for the Spanish buildings.

• **Keywords:** Design thermal conductivity, Temperature, Moisture content, Façade design, Spanish Technical Building Code (CTE).

RESUMEN

El Código Técnico de la Edificación vigente en España establece, como condiciones de referencia para determinar los valores térmicos de diseño de los productos de construcción, una temperatura de 10°C y un contenido de humedad en equilibrio a 23°C y 50% de humedad relativa. Sin embargo, estos valores de referencia no son coherentes con las condiciones climáticas reales del país, lo que se traduce en diseños optimistas de la envolvente térmica de los edificios y en consumos de energía superiores a los previstos en el diseño.

Este artículo analiza estas divergencias, revisa las debilidades del Código Técnico de la Edificación en la materia y estima la conductividad térmica real de los materiales de fachada mediante un nuevo procedimiento, capaz de obtener una precisión similar a la norma UNE-EN ISO 10456 con un menor esfuerzo de cálculo. Todo ello ha de contribuir a mejorar el diseño térmico actualmente establecido para los edificios españoles.

Palabras clave: Conductividad térmica de diseño, Temperatura, Humedad, Diseño de fachadas, Código Técnico de la Edificación.

1. INTRODUCCIÓN

Uno de los principales objetivos del diseño de la envolvente térmica de los edificios es reducir el consumo de energía necesario

para alcanzar el bienestar térmico en su interior [1-3]. Limitar la transmitancia térmica de los cerramientos que integran dicha envolvente, es una de las medidas de mayor importancia para alcanzar este objetivo [4-6]. La conductividad térmica de los productos de construcción determina esta transmitancia, constituyendo una de las principales características higrotérmicas a considerar para el diseño del edificio [7].

No obstante, la conductividad térmica de los materiales se ve afectada por la temperatura y humedad relativa ambiental presente en cada emplazamiento [8-10]. Así, en general un incremento de la temperatura o del contenido de humedad en la matriz porosa de los materiales, incrementa su valor de conductividad térmica [11,12]. En el actual contexto de limitación de la demanda energética, caracterizar adecuadamente la conductividad térmica que presentarán los productos de construcción en sus condiciones reales de operación, es una tarea clave para diseñar envolventes térmicas más ajustadas a las prestaciones requeridas [13,14].

A pesar de ello, numerosas normativas de construcción utilizan valores estandarizados de conductividad, basados en condiciones ambientales de referencia que son independientes de las realmente presentes en cada emplazamiento [15-18]. En España, el Código Técnico de la Edificación (CTE) establece como condición de referencia una temperatura de 10°C y un contenido de humedad en equilibrio a 23°C y 50% de humedad relativa (CTE DB-HE1.6.1.7) [19].

La conductividad de un material bajo estas condiciones concretas de temperatura T (°C) y humedad relativa ϕ (-) puede calcularse a partir de la conductividad proporcionada por el fabricante (conductividad declarada), utilizando el procedimiento recogido en la norma UNE-EN ISO 10456 [20]. Este procedimiento utiliza factores de conversión asociados a la temperatura (F_T), al contenido de humedad (F_M) y al envejecimiento del material (F_A), para aproximar la conductividad térmica del material en cualesquiera condiciones ambientales específicas λ_2 (W/(m·K)), a partir del valor de conductividad declarado en base a otras condiciones ambientales λ_1 (W/(m·K)). Como se observa en la Ec. (1), estos factores de conversión se obtienen a partir de coeficientes f_t (K⁻¹) y f_ψ (m³/m³) tabulados para diversos materiales, y de la diferencia de temperatura $T_2 - T_1$ (K) y de contenido de humedad en el material $\psi_2 - \psi_1$ (m³/m³) entre ambas condiciones ambientales. Cuando el valor de conductividad λ_1 considera los efectos del envejecimiento del material (como es habitual en los valores declarados por los fabricantes), puede obviarse el factor F_A [20].

$$\lambda_2 = \lambda_1 \cdot F_T \cdot F_M \cdot F_A = \lambda_1 \cdot e^{f_t(\tau_2 - \tau_1)} \cdot e^{f_\psi(\psi_2 - \psi_1)} \cdot F_A \quad (1)$$

Las condiciones de los edificios españoles, sometidos a moderadas o elevadas temperaturas ambientales y condiciones interiores de confort próximas a 20°C, hacen que los materiales que integran los cerramientos se encuentren habitualmente a temperaturas superiores a los 10 °C fijados por el CTE. La humedad relativa del 55% establecida por el CTE para espacios interiores sin elevada producción de humedad y los aún mayores valores de humedad relativa ambiental frecuentes en el país, hacen que tampoco sea realista considerar un valor ϕ igual al 50% en los materiales de construcción [21].

Estos desajustes provocan que la conductividad térmica de los materiales en sus condiciones reales de servicio sea superior al valor fijado por el CTE para el cálculo térmico del edificio [11, 12, 22, 23]. El cálculo térmico así realizado puede provocar diseños inadecuados e insuficientes de la envolvente térmica, pérdidas energéticas superiores a las inicialmente previstas y un mayor consumo de energía asociado a las instalaciones de climatización.

Por otra parte, el ajuste definido por la Ec. (1) tampoco resulta funcional para calcular los valores reales de conductividad en cada posible diseño térmico. Para su aplicación se necesita un laborioso cálculo que determine los valores de T y ϕ en cada hoja del cerramiento, así como el contenido de humedad presente en la matriz porosa de cada material [24]. Dado que el contenido de humedad en las matrices porosas no es directamente proporcional a la humedad relativa ambiental, es necesario determinar curvas isotermas de sorción empíricas que relacionen específicamente ambas magnitudes para cada material [25-26]. Cualquier variación de las condiciones de diseño (parámetros ambientales, espesor de los materiales u orden de las hojas del cerramiento), obligaría a repetir nuevamente dichos cálculos. Esta escasa funcionalidad ha propiciado que las normativas de construcción opten por agilizar el diseño, asumiendo simplificada mente condiciones estandarizadas para fijar la conductividad, tal y como sucede en el CTE.

No obstante, un procedimiento desarrollado recientemente permite soslayar estas dificultades, estimando la conductividad de los materiales de construcción con una precisión similar a la norma UNE EN ISO 10456 y un menor esfuerzo de cálculo [22]. Utilizando este procedimiento, el trabajo corrige los valores de conductividad establecidos por el CTE para materiales de fachada en las capitales de provincia y ciudades autónomas españolas (en adelante, simplemente capitales). Para ello se evalúan en cada emplazamiento las condiciones ambientales que se presentan a lo largo del año, calculando el factor de corrección más conservador asociado a dicha climatología. Finalmente, se proporcionan las herramientas necesarias para implementar un diseño térmico del edificio de mayor prestación en el actual CTE.

2. ANÁLISIS DE LAS CONDICIONES DE REFERENCIA UTILIZADAS PARA FIJAR LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA DE LOS PRODUCTOS DE CONSTRUCCIÓN EN ESPAÑA

La norma UNE-EN ISO 10456 establece 4 conjuntos de condiciones en base a las cuales los fabricantes deben determinar los valores declarados de conductividad de sus materiales y productos para la edificación (Tabla I). La condición declarada "Ib" coincide con las condiciones de referencia adoptadas por el CTE (10°C y un contenido de humedad en equilibrio con una humedad relativa del 50% a 23°C), lo que permite utilizar directamente en el diseño térmico los valores declarados por los fabricantes, sin necesidad de ajustes adicionales [20].

Aunque el conjunto de condiciones "Ib" se utiliza habitualmente como referencia para el diseño térmico en países caracterizados por bajas temperaturas ambientales [18, 27], éste no resulta directamente extrapolable al contexto climático español [28]. Tal y como recoge el propio CTE, la temperatura media anual en las 52 capitales del país puede oscilar desde 9,9°C en Burgos, hasta 18,5°C en Almería (alcanzando hasta 21°C en las capitales de las Islas Canarias). Además, estas temperaturas pueden sufrir acusadas variaciones estacionales, con diferencias entre los meses de verano e invierno de hasta 19°C. La humedad relativa presenta oscilaciones similares, con cambios estacionales de hasta un 35% y valores medios anuales que varían desde 56,4% en Madrid, hasta 80,3% en Ceuta [21].

Por su parte, las condiciones de confort higrotérmico más habituales en el interior de los edificios, se establecen para el cálculo en 20°C y una humedad relativa del 55% (considerando una clase higrotérmica 3, establecida por el CTE para zonas sin una elevada producción de humedad como oficinas, tiendas, almacenes y el interior de edificios residenciales), condiciones éstas mantenidas a lo largo de todo el año mediante las preceptivas instalaciones de climatización y renovación de aire [21]. En conjunto, todas estas condiciones de contorno sugieren que los valores de referencia adoptados por el CTE para determinar la conductividad de diseño de los materiales de construcción (condición declarada "Ib"), son poco realistas en la mayoría de los emplazamientos y a lo largo de la mayor parte del año.

Para valorar la magnitud de esta divergencia, se propone el análisis de la transmitancia térmica asociada a dos cerramientos de fachada (A y B), representativos de los convencionalmente utilizados en todo el país. La Fig. 1 muestra la composición de ambas soluciones constructivas, la conductividad térmica de sus materiales según la condición "Ib" fijada por el CTE (λ_{Ib}), y los valores f_t y f_ψ tabulados en la norma UNE-EN ISO 10456 para la aplicación de la Ec. (1). Ambos cerramientos se analizan en cuatro capitales

PROPIEDAD	CONJUNTO DE CONDICIONES			
	I		II	
	a)	b)	a)	b)
Temperatura de referencia	10°C	10°C	23°C	23°C
Humedad	u_{seco}	$u_{23,50}$	u_{seco}	$u_{23,50}$
Envejecimiento	envejecido	envejecido	envejecido	envejecido

u_{seco} es un contenido de humedad bajo, conseguido mediante secado.
 $u_{23,50}$ es el contenido de humedad cuando hay equilibrio con el aire a 23°C y humedad relativa de 50%.

Tabla I: Condiciones ambientales asociadas a los valores declarados de conductividad, según la norma UNE-EN ISO 10456:2012

españolas (Burgos, Almería, Madrid y Ceuta), considerando los valores mensuales más extremos de T y φ que se producen a lo largo del año en todas ellas [21].

Dado que el CTE establece la condición de referencia "Ib" indistintamente para todo el territorio, la transmitancia U (W/(m²·K)) de cada cerramiento es la misma en las cuatro ciudades analizadas (Tabla II). Para este cálculo se han considerado unas resistencias térmicas superficiales iguales a 0,04 y 0,13 m²·K/W, para los ambientes exterior e interior respectivamente [29]. El valor U de ambos cerramientos puede calcularse también adoptando las conductividades térmicas que presentarían los materiales bajo las condiciones declaradas "Ia", "IIa" y "IIb", así como bajo las condi-

ciones ambientales reales correspondientes a los meses más extremos de verano e invierno en los cuatro emplazamientos.

La conductividad de cada material considerando cada conjunto de condiciones ambientales, ha sido calculada utilizando el laborioso procedimiento recogido en la norma UNE-EN ISO 10456 (Ec. 1). Así, se han determinado los factores de conversión F_T y F_M asociados a la temperatura y contenido de humedad en cada hoja de ambos cerramientos. El contenido de humedad de cada material se ha estimado mediante las isoterms de sorción proporcionadas por el software WUFI Light 5.3, desarrollado por el *Fraunhofer Institute for Building Physics* [30]. Así, a cada condición de humedad relativa en el material, le corresponde un determinado contenido de

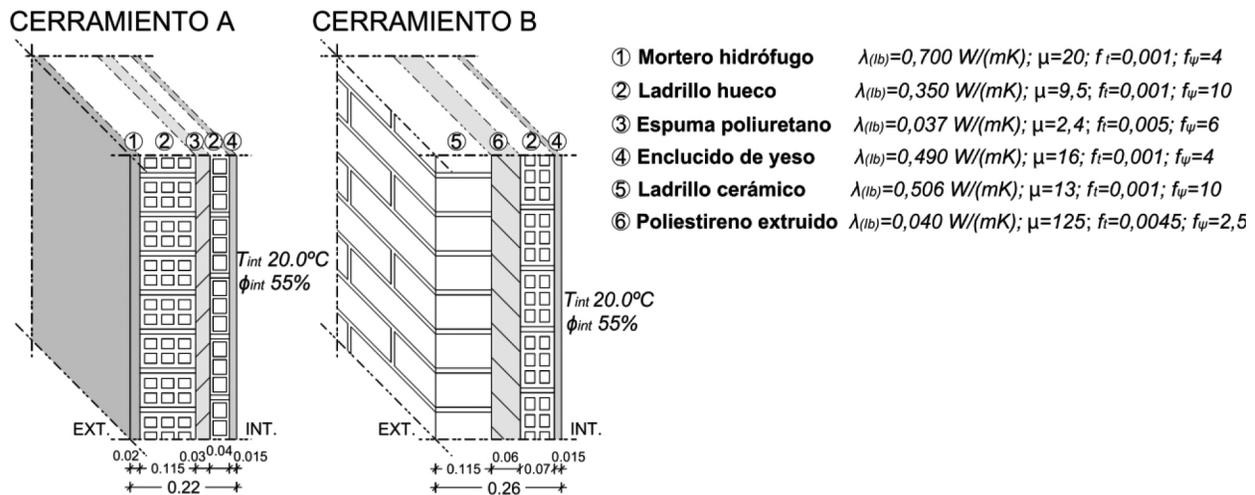


Fig. 1: Composición de los cerramientos de fachada analizados y propiedades higrotérmicas asociadas a sus materiales

Transmitancia térmica a considerar en el diseño térmico (m²K/W)								
Cerramiento A								
	Mes [21]	T (°C)	φ (%)	U _{UNE}	U _{Ia}	U _{Ib (CTE)}	U _{IIa}	U _{IIb}
Burgos	Ene. (*)	2,6	86	0,682	0,663 (-2,8%)	0,674 (-1,2%)	0,690 (+1,2%)	0,702 (+2,9%)
	Ago.	18,3	62	0,696	0,663 (-4,7%)	0,674 (-3,2%)	0,690 (-0,9%)	0,702 (+0,9%)
Almería	Ene.	12,4	70	0,692	0,663 (-4,2%)	0,674 (-2,6%)	0,690 (-0,3%)	0,702 (+1,4%)
	Ago.	26,0	66	0,703	0,663 (-5,7%)	0,674 (-4,1%)	0,690 (-1,8%)	0,702 (-0,1%)
Madrid	Ene.	6,2	71	0,698	0,663 (-5,0%)	0,674 (-3,4%)	0,690 (-0,9%)	0,702 (+0,6%)
	Jul.	24,4	37	0,699	0,663 (-5,2%)	0,674 (-3,6%)	0,690 (-1,3%)	0,702 (+0,4%)
Ceuta	Ene.	11,5	87	0,694	0,663 (-4,5%)	0,674 (-2,9%)	0,690 (-0,6%)	0,702 (+1,2%)
	Ago.	22,2	87	0,702	0,663 (-5,6%)	0,674 (-4,0%)	0,690 (-1,7%)	0,702 (+0,0%)
(*) En este caso concreto, se ha añadido una barrera de vapor para evitar condensaciones intersticiales en el cerramiento.								
Cerramiento B								
	Mes [21]	T (°C)	φ (%)	U _{UNE}	U _{Ia}	U _{Ib (CTE)}	U _{IIa}	U _{IIb}
Burgos	Ene.	2,6	86	0,474	0,466 (-1,7%)	0,470 (-0,8%)	0,489 (+3,2%)	0,493 (+4,0%)
	Ago.	18,3	62	0,487	0,466 (-4,3%)	0,470 (-3,5%)	0,489 (+0,4%)	0,493 (+1,2%)
Almería	Ene.	12,4	70	0,482	0,466 (-3,3%)	0,470 (-2,5%)	0,489 (+1,5%)	0,493 (+2,3%)
	Ago.	26,0	66	0,495	0,466 (-5,9%)	0,470 (-5,1%)	0,489 (-1,2%)	0,493 (-0,4%)
Madrid	Ene.	6,2	71	0,477	0,466 (-2,3%)	0,470 (-1,5%)	0,489 (+2,5%)	0,493 (+3,4%)
	Jul.	24,4	37	0,492	0,466 (-5,3%)	0,470 (-4,5%)	0,489 (-0,6%)	0,493 (+0,2%)
Ceuta	Ene.	11,5	87	0,482	0,466 (-3,3%)	0,470 (-2,5%)	0,489 (+1,5%)	0,493 (+2,3%)
	Ago.	22,2	87	0,492	0,466 (-5,3%)	0,470 (-4,5%)	0,489 (-0,6%)	0,493 (+0,2%)

Tabla II: Transmitancia térmica de ambos cerramientos considerando diferentes condiciones de referencia, y desviación comparativa respecto de los valores de transmitancia ajustados según norma UNE-EN ISO 10456.

$$\psi_{diseño} \approx \frac{\left(\frac{P_{v\ ext} + P_{v\ int}}{2}\right)}{610,5 \cdot e^{\left(\frac{17,269 \cdot \left(\frac{T_{sxt} + T_{int}}{2}\right)}{273,3 + \left(\frac{T_{sxt} + T_{int}}{2}\right)}\right)}} \cdot 0,0107 \quad (2)$$

humedad, caracterizado por su curva de sorción característica. El factor de resistencia a la difusión de vapor μ (representado en la Fig. 1), permite referenciar el material concreto seleccionado en la amplia base de datos del software. Por su parte, los valores de T y φ que presenta cada material en las condiciones reales de los meses de verano e invierno, se han obtenido mediante simples relaciones higrotérmicas proporcionadas por el propio CTE, considerando un ambiente interior con una clase higrotérmica 3 [21,24].

Como se aprecia en la Tabla II, la transmitancia térmica de los cerramientos se ve modificada por las condiciones ambientales presentes en cada emplazamiento y época del año. Pueden identificarse así importantes variaciones estacionales y geográficas, que no son consideradas por el CTE al asumir simplificada unas condiciones de referencia estandarizadas.

Por su parte, la transmitancia térmica asociada a las condiciones declaradas "Ia", "Ib", "IIa" y "IIb", resulta progresivamente mayor cuanto más elevado es el valor de T y φ que las caracteriza. Como resultado, los valores U_{Ia} y U_{Ib} (establecidos a una temperatura de 10°C), siempre resultan inferiores al valor ajustado según la norma UNE, incluso en aquellos emplazamientos y meses de menor temperatura (véase Burgos, mes de enero). En el caso de la condición adoptada por el CTE ("Ib"), la transmitancia calculada

resulta entre un 0,8% y 5,1% inferior a la real a lo largo de todo el año, lo que se traduce en diseños optimistas de la envolvente y pérdidas energéticas mayores que las previstas en el diseño.

Considerando los actuales esfuerzos por alcanzar una mayor eficiencia energética en las edificaciones (con modelos de edificios de energía cero, normativas de construcción más exigentes o herramientas de diseño térmico más sofisticadas y precisas), estas desviaciones no resultan despreciables y por lo tanto, deberían ser corregidas. En este sentido, solo el conjunto de condiciones declaradas "IIb" ofrece valores de transmitancia habitualmente superiores a los de la norma UNE y por lo tanto, conservadores desde el punto de vista del cálculo térmico durante la mayor parte del año. Sin embargo, la utilización de un único conjunto de condiciones estandarizadas seguiría sin ajustar la prestación de cada cerramiento a las condiciones climáticas específicas en cada emplazamiento.

2.1. ESTIMACIÓN FUNCIONAL DE LA CONSTRUCTIVIDAD TÉRMICA DE DISEÑO MEDIANTE FACTORES CORRECTORES

Para alcanzar un diseño ajustado a la prestación requerida en cada emplazamiento, el laborioso procedimiento de cálculo recogido en la norma UNE-EN ISO 10456 debería ser sustituido por otro más práctico y funcional. Así, ha sido recientemente desarrollado un procedimiento capaz de soslayar el cálculo de la temperatura, humedad relativa y contenido de humedad en cada material del cerramiento, cuyas bases teóricas se desglosan en las siguientes referencias [22,23].

Para ello, este procedimiento utiliza únicamente los valores de temperatura y humedad relativa que definen las condiciones de

$$\lambda_{diseño} \approx \lambda_{Ib\ (CTE)} \cdot CCF = \lambda_{Ib\ (CTE)} \cdot e^{0,0036\left(\frac{T_{sxt} + 20}{2} - 10\right)} \cdot e^{4,96(\psi_{diseño} - 0,0053)} \quad (3)$$

Transmitancia térmica para el diseño térmico (m²K/W)							
Cerramiento A							
	Mes [21]	T (°C)	φ (%)	CCF (3)	U_{UNE}	U_{CCF}	$U_{Ib\ (CTE)}$
Burgos	Ene. (*)	2,6	86	1,0166	0,682	0,684 (+0,3%)	0,674 (-1,2%)
	Ago.	18,3	62	1,0384	0,696	0,697 (+0,1%)	0,674 (-3,2%)
Almería	Ene.	12,4	70	1,0295	0,692	0,692 (+0,0%)	0,674 (-2,6%)
	Ago.	26,0	66	1,0551	0,703	0,707 (+0,6%)	0,674 (-4,1%)
Madrid	Ene.	6,2	71	1,0195	0,698	0,686 (-1,7%)	0,674 (-3,4%)
	Jul.	24,4	37	1,0425	0,699	0,700 (+0,1%)	0,674 (-3,6%)
Ceuta	Ene.	11,5	87	1,0315	0,694	0,693 (-0,1%)	0,674 (-2,9%)
	Ago.	22,2	87	1,0534	0,702	0,706 (+0,6%)	0,674 (-4,0%)
(*) En este caso concreto, se ha añadido una barrera de vapor para evitar condensaciones intersticiales en el cerramiento.							
Cerramiento B							
	Mes [21]	T (°C)	φ (%)	CCF (3)	U_{UNE}	U_{CCF}	$U_{Ib\ (CTE)}$
Burgos	Ene.	2,6	86	1,0166	0,474	0,477 (+0,6%)	0,470 (-0,8%)
	Ago.	18,3	62	1,0384	0,487	0,486 (-0,2%)	0,470 (-3,5%)
Almería	Ene.	12,4	70	1,0295	0,482	0,483 (+0,2%)	0,470 (-2,5%)
	Ago.	26,0	66	1,0551	0,495	0,494 (-0,2%)	0,470 (-5,1%)
Madrid	Ene.	6,2	71	1,0195	0,477	0,478 (+0,2%)	0,470 (-1,5%)
	Jul.	24,4	37	1,0425	0,492	0,488 (-0,8%)	0,470 (-4,5%)
Ceuta	Ene.	11,5	87	1,0315	0,482	0,484 (+0,4%)	0,470 (-2,5%)
	Ago.	22,2	87	1,0534	0,492	0,493 (+0,2%)	0,470 (-4,5%)

Tabla III: Transmitancia térmica de ambos cerramientos ajustados mediante la norma UNE-EN ISO 10456 y mediante el factor de corrección CCF

contorno interiores y exteriores del cerramiento, calculando una presión de vapor media en el cerramiento P_v (Pa) mediante relaciones higrotérmicas como las recogidas en el propio CTE [21]. Como resultado, el contenido de humedad real de todos los materiales presentes en un cerramiento de fachada convencional, se aproxima simplificada mediante la Ec. (2).

Aplicando diferentes simplificaciones al método recogido en la norma UNE-EN ISO 10456, estos mismos datos de partida permiten también corregir la conductividad térmica fijada por el CTE para los materiales presentes en estas fachadas ($\lambda_{lb(CTE)}$). Así, tomando una clase higrotérmica 3 como condiciones interiores de diseño, la Ec. (3) permite realizar esta corrección con un menor esfuerzo de cálculo y una precisión similar a la de la norma UNE. Los coeficientes mostrados en las Ecs. (2) y (3) se determinan a partir de aproximaciones y promedios basados en los valores tabulados por la propia norma UNE [22,23]. Pueden a su vez adaptarse para corregir la conductividad en otros tipos de cerramiento (por ejemplo, cubiertas), así como en fachadas carentes de hojas de albañilería. Del mismo modo, podría ser necesario su ajuste en caso de utilizar materiales aislantes naturales (como la lana de oveja), dada la mayor relevancia del comportamiento higroscópico en su desempeño térmico.

Multiplicando con este factor de corrección adimensional (*CCF* o *conductivity correction factor*), el valor de conductividad térmica de todos los materiales presentes en los cerramientos mostrados en la Fig. 1, se aprecia como los nuevos valores U_{CCF} obtenidos se ajustan a las condiciones de operación previstas en cada emplazamiento y mes, reduciendo significativamente la desviación asociada al CTE (Tabla III).

Como se observa, el factor de corrección *CCF* identificado en todos los casos es mayor que la unidad, lo que sugiere la necesidad de incrementar la conductividad considerada por el CTE en todos los emplazamientos, incluso en los meses de menor temperatura o humedad relativa. Así, la desviación del nuevo valor U_{CCF} respecto al valor más próximo al real (calculado mediante la norma UNE-EN ISO 10456), no supera el 1,7% para el cerramiento A, mientras que mediante la condición "Ib" (CTE) ésta desviación ascendía hasta el 4,1%. A su vez, en el cerramiento B la desviación máxima se sitúa en el 0,8%, frente al 5,1% asociado al CTE.

3. AJUSTE DE LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA DE DISEÑO PARA MATERIALES DE FACHADA EN ESPAÑA

Estudios previos han demostrado igualmente la validez de estos factores de corrección para otras condiciones ambientales, emplazamientos y configuraciones de fachada. En todos los casos, la transmitancia térmica obtenida mediante dicha corrección aproxima el valor de U con mayor precisión que el cálculo establecido por el CTE [22,23]. No obstante, hasta el momento estos estudios se han centrado preferentemente en determinar los valores de *CCF* asociados a las condiciones climáticas medias anuales presentes en los emplazamientos.

Sin embargo, aunque estos valores medios anuales pueden ser utilizados para una corrección general de la conductividad, es necesario evaluar los datos climáticos extremos que se producen en cada emplazamiento para fijar valores de diseño conservadores a lo largo de todo el año. Con este objetivo se han analizado en este trabajo los registros medios mensuales de temperatura y humedad relativa en cada una de las 52 capitales españolas, determinando mes a mes el factor de corrección *CCF* asociado a dichas condiciones ambientales. La serie de datos climáticos utilizada para este cálculo se ha tomado de los valores tabulados en el propio

CTE [21]. En general, las condiciones ambientales de T y ϕ que determinan un mayor factor de corrección se producen durante los meses de julio y agosto, debido principalmente a las elevadas temperaturas habituales en los emplazamientos españoles durante el verano (Tabla IV).

Ciudad	Mes (*)	T _{ext} (°C)	Φ _{ext} (%)	CCF
Albacete	Agosto	23,7	50	1,0452
Alicante	Agosto	25,5	68	1,0547
Almería	Agosto	26,0	66	1,0551
Ávila	Julio	19,9	39	1,0351
Badajoz	Julio	25,3	50	1,0483
Barcelona	Agosto	23,0	72	1,0506
Bilbao	Agosto	19,8	75	1,0448
Burgos	Agosto	18,3	62	1,0384
Cáceres	Julio	26,1	37	1,0456
Cádiz	Agosto	24,5	69	1,0528
Castellón	Agosto	24,5	69	1,0528
Ceuta	Agosto	22,2	97	1,0534
Ciudad Real	Julio	25,0	47	1,0468
Córdoba	Agosto	26,7	49	1,0508
A Coruña	Agosto	18,9	79	1,0440
Cuenca	Agosto	22,1	46	1,0410
Girona	Agosto	22,4	68	1,0481
Granada	Julio	24,3	42	1,0439
Guadalajara	Julio	23,5	53	1,0458
Huelva	Agosto	25,7	54	1,0505
Huesca	Agosto	22,7	53	1,0442
Jaén	Agosto	27,1	45	1,0502
León	Julio	19,7	52	1,0383
Lleida	Agosto	24,0	54	1,0471
Logroño	Julio	22,2	55	1,0439
Lugo	Agosto	17,5	75	1,0402
Madrid	Julio	24,4	37	1,0425
Málaga	Agosto	25,3	63	1,0526
Melilla	Agosto	25,3	68	1,0542
Murcia	Agosto	24,6	74	1,0547
Orense	Julio	21,9	61	1,0450
Oviedo	Agosto	18,3	80	1,0431
Palencia	Julio	20,7	58	1,0418
Palma	Agosto	25,3	71	1,0552
Las Palmas	Septiembre	23,9	69	1,0516
Pamplona	Agosto	20,3	61	1,0419
Pontevedra	Julio	20,7	65	1,0438
S. Sebastián	Agosto	18,7	83	1,0447
Salamanca	Julio	21,0	50	1,0401
St. Cruz Ten.	Septiembre	24,4	63	1,0507
Santander	Agosto	19,5	78	1,0450
Segovia	Julio	21,6	47	1,0404
Sevilla	Agosto	26,8	52	1,0520
Soria	Julio	19,9	53	1,0389
Tarragona	Agosto	25,3	62	1,0523
Teruel	Julio	21,3	50	1,0407
Toledo	Julio	26,5	43	1,0484
Valencia	Agosto	24,5	69	1,0528
Valladolid	Agosto	21,3	46	1,0395
Vitoria	Agosto	18,5	70	1,0408
Zamora	Julio	21,8	47	1,0407
Zaragoza	Agosto	23,8	54	1,0467

(*) Combinación más desfavorable de T y ϕ respecto a las condiciones consideradas por el CTE ("Ib").

Tabla IV: Valores máximos anuales del factor de corrección *CCF* en las capitales españolas, considerando 20°C y una humedad relativa del 55% en el interior de los edificios (clase higrotérmica 3)

Los factores de corrección máximos calculados en las 52 capitales españolas oscilan entre 1,0351 (Ávila) y 1,0552 (Palma de Mallorca), lo que se traduce en la necesidad de incrementar la conductividad térmica de los materiales actualmente utilizada por el CTE entre un 3,51 y 5,52%. Para la implementación de esta corrección en el actual diseño térmico de las fachadas, únicamente sería necesario multiplicar los valores de conductividad térmica habituales, por el coeficiente corrector correspondiente al emplazamiento en el que se ubicará el edificio a diseñar.

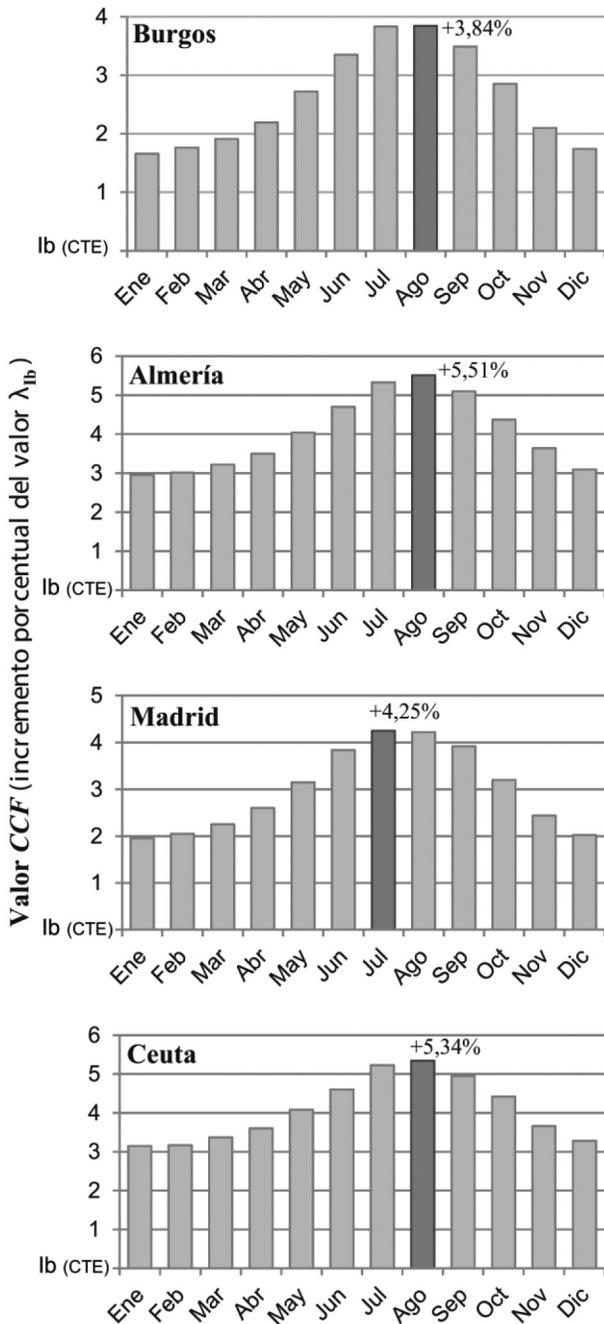


Fig. 2: Evolución mensual del factor corrector CCF en cuatro de los emplazamientos españoles analizados

La Fig. 2 representa la evolución anual de estos factores de corrección, tomando como ejemplo las mismas ciudades previamente analizadas en el apartado 2 (Burgos, Almería, Madrid y Ceuta). Como se aprecia, las correcciones necesarias son menores cuando las condiciones climáticas ambientales se aproximan a la temperatura (10°C) y humedad relativa (50%), establecidos por la condición Ib para los materiales. Todos los valores CCF obtenidos

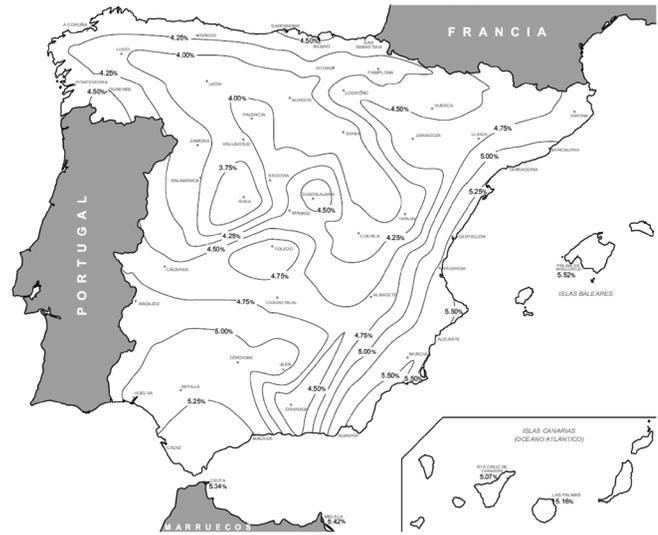


Fig. 3: Mapa de corrección para la conductividad térmica de materiales de fachada (incremento porcentual del valor λ_{Ib})

mensualmente en las 52 capitales son mayores que 1, lo que confirma la inadecuada elección de la condición declarada Ib para el contexto climático español, incluso en los meses invernales. Así, el factor de corrección mínimo se identifica durante el mes de enero en Ávila, con un valor de 1,0156 o lo que es lo mismo, aun en dicha situación sería necesario incrementar las conductividades térmicas consideradas por el CTE para los materiales un 1,56%.

Para analizar la distribución geográfica de estas correcciones, los valores CCF máximos presentados en la Tabla IV se han utilizado para elaborar un mapa de isocorreas, caracterizando mediante interpolaciones lineales el factor de corrección entre los emplazamientos analizados (Fig. 3). Dicho mapa de corrección puede facilitar la implementación del procedimiento en el actual CTE, estableciendo correcciones aproximadas incluso lejos de las capitales del país. Todo ello posibilita un ajuste funcional de la conductividad térmica de los materiales de fachada en cualquier emplazamiento español.

En el mapa elaborado se observa la necesidad de una mayor corrección de los valores $\lambda_{Ib(CTE)}$ en las zonas costeras del mediterráneo, el suroeste de la Península Ibérica y las Islas Canarias (correcciones superiores al +5%), como resultado de la combinación de altas humedades relativas y elevadas temperaturas estivales. La menor necesidad de corrección se identifica en la sub-meseta norte y el sistema ibérico (inferior al +4%), aunque el análisis de un mayor número de emplazamientos permitiría caracterizar con mayor exhaustividad otras zonas específicas como los Pirineos, donde es también previsible una menor corrección.

La precisión de este mapa de corrección puede ser incrementada si se consideran datos climáticos más exhaustivos (referidos a registros diarios o incluso horarios) y si se analiza un mayor número de emplazamientos repartidos por todo el país. Recientes estudios elaborados para el territorio de dos regiones españolas (Aragón y Cataluña), son una buena muestra de estas mejoras potenciales [23]. A su vez, el procedimiento de cálculo permite que estos factores de corrección puedan ser también adaptados a otras condiciones de diseño para el ambiente interior (diferentes de la clase higrotérmica 3), ajustando los coeficientes utilizados en las Ecs. (2) y (3) [22, 23]. Del mismo modo, podrían elaborarse mapas de corrección para otros países donde las condiciones ambientales fijadas por la normativa no sean representativas de las condiciones reales (ajustando adecuadamente los coeficientes de las ecuaciones recogidas en el punto 2.1).

4. CONCLUSIONES

En este trabajo se han analizado los parámetros de referencia establecidos por el CTE para fijar la conductividad térmica de los productos de construcción. Se ha comprobado como dichos parámetros no resultan adecuados para la climatología presente en el territorio español, lo que puede provocar diseños térmicos optimistas, basados en transmitancias térmicas de los cerramientos inferiores a las reales. La utilización de un único conjunto de parámetros de referencia para todo el país, impide además ajustar este diseño a las prestaciones requeridas en cada emplazamiento.

Utilizando un novedoso procedimiento, capaz de estimar con elevada funcionalidad y precisión valores más adecuados de conductividad térmica, se ha propuesto una corrección funcional de los valores de conductividad establecidos por el CTE para materiales de fachada. Evaluando las condiciones ambientales mensuales en las 52 capitales de provincia y ciudades autónomas españolas, han sido identificados los factores de corrección que posibilitan un ajuste conservador de la conductividad térmica durante todo el año.

Estos factores de corrección incrementan los actuales valores de conductividad de los materiales entre un 3,51 y un 5,52%, según las condiciones climáticas presentes en cada ciudad analizada. En general, estas correcciones son mayores en áreas costeras y el sur de España, debido a las mayores temperaturas y humedades relativas habituales en los materiales de estos emplazamientos. Para su posible implementación en la normativa actual, estos factores de corrección han sido representados geográficamente mediante un mapa de isolinias.

El uso de estas correcciones ha de permitir utilizar valores de conductividad para los materiales más realistas, ajustados a las condiciones reales de operación presentes en cada emplazamiento. Todo ello representa una importante oportunidad de mejora para el diseño de las envolventes térmicas en los edificios españoles, ajustando su diseño a las prestaciones requeridas bajo cada condición climática característica.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Omer AM. "Energy, environment and sustainable development". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Vol.12 p.2265-2300. (DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2007.05.001>)
- [2] Horne R, Hayles C. "Towards global benchmarking for sustainable homes: an international comparison of the energy performance of housing". *Journal of Housing and the Built Environment*. Vol.23-2 p.119-130. (DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s10901-008-9105-1>)
- [3] Chwieduk D. "Towards sustainable-energy buildings". *Applied Energy*. Vol.76 p.211-217. (DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0306-2619\(03\)00059-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0306-2619(03)00059-X))
- [4] Pacheco R, Ordóñez J, Martínez G. "Energy efficient design of building: a review". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Vol.16 p.3559-3573. (DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2012.03.045>)
- [5] Kossecka E, Kosny J. "Influence of insulation configuration on heating and cooling loads in a continuously used building". *Energy and Buildings*. Vol.34-4 p.321-331. (DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0378-7788\(01\)00121-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0378-7788(01)00121-9))
- [6] Rodríguez B, Domínguez J, Pérez JM, et al. "Review of international regulations governing the thermal insulation requirements of residential buildings and the harmonization of envelope energy loss". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Vol.34 p.78-90. (DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2014.03.009>)
- [7] Zhang Y, Du K, He J, et al. "Impact factors analysis on the thermal performance of hollow block wall". *Energy and Buildings*. Vol.75 p.330-341. (DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.02.037>)
- [8] Domínguez F, Anderson B, Cejudo JM, et al. "Uncertainty in the thermal conductivity of insulation materials". *Energy and Buildings*. Vol.42 p.2159-2168. (DOI: <http://dx.doi.org/10.1019/j.enbuild.2010.07.006>)
- [9] Ochs F, Heidemann W, Müller-Steinhagen H. "Effective thermal conductivity of moistened insulation materials as a function of temperature". *International Journal of Heat and Mass Transfer*. Vol.51 p.539-552. (DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2007.05.005>)

- [10] Jerman M, Černý R. "Effect of moisture content on heat and moisture transport and storage properties of thermal insulation materials". *Energy and Buildings*. Vol.53 p.39-46. (DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.07.002>)
- [11] Dell'Isola M, d'Ambrosio FR, Giovinco G, et al. "Experimental analysis of thermal conductivity for building materials depending on moisture content". *International Journal of Thermophysics*. Vol.33 p.1674-1685. (DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s10765-012-1215-z>)
- [12] Abdou A, Budaiwi I. "Comparison of thermal conductivity measurements of building insulation materials under various operating temperatures". *Journal of Building Physics*. Vol.29 p.171-184. (DOI: <http://dx.doi.org/10.1177/1744259105056291>)
- [13] Prada A, Cappelletti F, Baggio P, et al. "On the effect of material uncertainties in envelope heat transfer simulations". *Energy and Buildings*. Vol.71 p.53-60. (DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.11.083>)
- [14] Moon HJ, Ryu SH, Kim JT. "The effect of moisture transportation on energy efficiency and IAQ in residential buildings". *Energy and Buildings*. Vol.75 p.439-446. (DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.02.039>)
- [15] ASHRAE. *ASHRAE Handbook of Fundamentals - Heat, air and moisture control in building assemblies*. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers (ASHRAE), 2009.
- [16] CEN. *Building materials and products - Hygrothermal properties - Tabulated design values*. EN 12524. Bruselas: European Committee for Standardization (CEN), 2007.
- [17] DIN. *Thermal insulation and energy economy in buildings - Hygrothermal design values*. DIN 4108-4. Berlin: Deutsches Institut für Normung (DIN), 2004.
- [18] CIBSE. *CIBSE Guide A - Environmental design. Thermal properties of building structures - Section 3.3.7*. Londres: The Chartered Institution of Building Services Engineers (CIBSE), 2007.
- [19] Gobierno de España. *Código Técnico de la Edificación - Documento Básico HE1 Limitación de la demanda energética - Sección 6.1*. Madrid: Ministerio de Fomento, 2013.
- [20] AENOR. *Materiales y productos para la edificación. Propiedades higrótérmicas. Valores tabulados de diseño y procedimientos para la determinación de los valores térmicos declarados y de diseño*. UNE-EN ISO 10456. Madrid: Asociación Española de Normalización (AENOR), 2012.
- [21] Gobierno de España. *Código Técnico de la Edificación - Documento de Apoyo DB-HE / 2 Comprobación de limitación de condensaciones superficiales e intersticiales en los cerramientos - Apéndice C*. Madrid: Ministerio de Fomento, 2013.
- [22] Pérez JM, Domínguez J, Cano E, et al. "A correction factor to approximate the design thermal conductivity of building materials. Application to Spanish façades". *Energy and Buildings*. Vol.88 p.153-164. (DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.12.005>)
- [23] Pérez JM, Domínguez J, Cano E, et al. "Detailed territorial estimation of design thermal conductivity for façade materials in North-Eastern Spain". *Energy and Buildings*. Vol.102 p.266-276. (DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.05.025>)
- [24] AENOR. *Características higrótérmicas de los elementos y componentes de edificación. Temperatura superficial interior para evitar la humedad superficial crítica y la condensación intersticial. Métodos de cálculo*. UNE-EN ISO 13788. Madrid: Asociación Española de Normalización (AENOR), 2002.
- [25] Krus M. *Moisture transport and storage coefficients of porous mineral building materials - Theoretical principles and new test methods*. Stuttgart: [Fraunhofer IRBVerlag], 1996.
- [26] AENOR. *Prestaciones higrótérmicas de los productos y materiales para edificios. Determinación de las propiedades de sorción higroscópica*. UNE-EN ISO 12571. Madrid: Asociación Española de Normalización (AENOR), 2000.
- [27] Finnish Government. *National Building Code of Finland, Document C4 - Thermal insulation guidelines 2003 - Section 4*. Helsinki: Ministry of the Environment, 2003.
- [28] Kottek M, Grieser J, Beck C, et al. "World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated". *Meteorologische Zeitschrift*. Vol.15 p.259-263. (DOI: <http://dx.doi.org/10.1127/0941-2948/2006/0130>)
- [29] Gobierno de España. *Código Técnico de la Edificación - Documento de Apoyo DB-HE / 1 Cálculo de parámetros característicos de la envolvente - Apartado 2.1.1*. Madrid: Ministerio de Fomento, 2015.
- [30] Fraunhofer IBP Software. *WUFI light 5.3*. Disponible en Web: <http://www.wufi.de/index_e.html> [Consulta 15 de marzo de 2016]

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación ha sido parcialmente financiada por el Ministerio de Ciencia e Innovación y cofinanciada con fondos FEDER a través del proyecto de investigación BIA2012-31609.