

OPTIMUM THICKNESS FOAM THERMAL INSULATION IN BUILDINGS.

Arrué Burillo, Paloma; Cárcel González, Alfonso Cristóbal; Romero Sedó, Antonio
Manuel; Aparicio Fernández, Carolina
Universitat Politècnica de València

In this paper the calculation methodology for obtaining optimum thickness of polymeric foams EPS, XPS and PU is developed, taking into account investment costs and operating costs in the construction elements whose thermal transmittance limit is determined by the CTE. The use of a thicker insulating material produces a higher investment cost but the energy cost is less, this relationship allows for the optimum thickness to determine a minimum total cost. The energy study is conducted with varying monthly temperatures for a locality of reference and for a period of 10 years.

Keywords: Foams; Thermal isolation; Thermal transmittance; Optimization; Costs

ESPESOR ÓPTIMO DE ESPUMAS AISLANTES TÉRMICAS EN EDIFICACIÓN.

En este trabajo se desarrolla la metodología de cálculo para la obtención del espesor óptimo de espumas poliméricas EPS, XPS y PU, teniendo en cuenta los costes de inversión y costes de funcionamiento en los elementos constructivos cuya transmitancia térmica límite está determinada por el CTE. La utilización de un material aislante de mayor espesor produce un mayor coste de inversión pero el coste energético es menor, esta relación permite obtener el espesor óptimo que determine un coste total mínimo. El estudio energético se realiza con la variación de temperaturas mensuales para una localidad de referencia y para un periodo de 10 años.

Palabras clave: Espumas; Aislamiento térmico; Transmitancia térmica; Optimización; Costes.

1. Introducción

El análisis del balance energético del elemento constructivo se realiza en dos tipos de fachada y con dos orientaciones diferentes. El elemento constructivo está compuesto por diversos materiales comúnmente utilizados en construcción en los cuales se irá variando el tipo de aislante térmico y su espesor, manteniendo constantes el resto de parámetros con el objeto de analizar su influencia. La zona climática considerada es la de la ciudad de Valencia clasificada como B3 en el CTE.

El estudio de costes para la elección de un material aislante relaciona el coste de inversión de cada tipo y el coste energético producido, debido a que en los edificios se requieren de las instalaciones de equipos de calefacción y/o climatización para mantener constantes las condiciones de confort deseadas generando un gasto energético. Este coste energético se obtendrá a partir del flujo de calor que atraviesa el cerramiento en un periodo anual obtenido mediante el programa en régimen transitorio (TRNSYS, 2004) y el coste de tarificación de la energía eléctrica, para el caso particular de que fuera este tipo de energía la fuente de alimentación del equipo de emisión calorífica, que proporciona las condiciones de confort estables del recinto. Se realiza el estudio para un tiempo de funcionamiento de 10 años y se considera que el rendimiento de los equipos es del 30% sobre la demanda de energía o el flujo de calor perdido o ganado.

2. Objetivos

Con este estudio se pretende determinar el coste total que proporciona cada tipo de material y cerramiento en un tiempo de estudio de 10 años, permitiendo obtener el espesor óptimo de cada material aislante y el coste total mínimo (Izquierdo et al., 2005). Esto permite analizar la influencia del tipo de cerramiento, orientación, tipo de material aislante y relación de coste energético térmico respecto al eléctrico que permitan influir en la toma de decisiones de resolución de diseño de los elementos constructivos.

3. Metodología y caso estudio

El estudio se ha realizado considerando las soluciones constructivas propuestas en el catálogo de elementos constructivos del CTE (IETCC, 2016). Para este estudio se han comparado las fachadas F1.1. y F1.3., correspondientes a fábricas de ladrillo visto sin cámara de aire y con aislamiento térmico por el interior. La diferencia entre ambas soluciones de fachada es la hoja interior, que en la primera está resuelto con fábrica de ladrillo cerámico hueco y revestimiento interior realizado con tendido de yeso y pintura, mientras que la segunda fachada está resuelta con placa de yeso laminado y pintura (ver figura 1).

En este trabajo en cada una de las fachadas se utilizan seis materiales aislantes térmicos y distintos espesores. Los espesores considerados están comprendidos en un rango entre 0 y 12 cm en cada solución constructiva. También se consideran dos orientaciones totalmente opuestas (norte y sur) para poder evaluar si la orientación es decisiva a la hora de elegir el material aislante (ver tabla 1).

Tabla 1. Variables de estudio

Variables de estudio						
1	Tipos de fachadas.		F 1.1.		F 1.3	
2	Tipos de orientación.		Norte		Sur	
3	Tipos de aislante térmico.		EPS-1	EPS-2	EPS-3	XPS-2 PU-1 PU-2
4	Espesor del material aislante.		De 0 a 120 mm			
5	Energía transmitida en el muro del modelo considerado (kWh/m ² ·año)		Flujo de energía			
6	Relación del coste energético térmico respecto al coste energético eléctrico. Coef.=E _{térmica} /E _{eléctrica}		Coeficiente rendimiento equipos 30%			

Las simulaciones se han realizado con el programa en régimen transitorio TRNSYS. Este programa en su aplicación en edificios es conforme a la ASHRAE 140 y se puede usar para el cumplimiento de ASHRAE 90.1, así como a la directiva europea de eficiencia energética en edificios y se emplea para verificar los créditos de energía en el proceso de certificación LEED. En el programa se ha definido un volumen habitable de 6x6x3 metros, como un salón. El espacio considerado no tiene huecos, evitando así las ganancias solares y las pérdidas de calor a través de los huecos de fachada. Una vez definida la fachada y la zona climática (Valencia) se obtiene el resultado de energía anual por m² de fachada construida. Este valor es independiente de la superficie útil del local considerado, lo que permite extrapolar el resultado a cualquier edificación con la misma tipología y obtener conclusiones de la influencia del tipo de cerramiento, material aislante y orientación.

3.1 Coste de inversión

Los materiales aislantes térmicos estudiados son espumas poliméricas de celda cerrada como el poliestireno expandido (EPS-1, 2 y 3), poliestireno extrusionado (XPS-2) y poliuretano (PU-1 y PU-2) con las características indicadas en la tabla 2. Estas características han sido facilitadas por las empresas suministradoras (Poliespor, 2015; Ursa, 2015; Poliuretanos, 2015).

Tabla 2. Materiales aislantes

Materiales	Peso específico γ (kp/m ³)	Coste C _a (€/m ³)	Conductividad térmica λ (W/m·K)
EPS-1 Tipo III	15	27	0.039
EPS-2 Tipo IV	20	31	0.036
EPS-3 Tipo V	25	37	0.035
XPS-2 Wallmate IB-A	30	291.66	0.035
PU-1 D-40	16	207.59	0.023
PU-2 D-70	47	375.95	0.021

El coste de inversión del aislante térmico por unidad de superficie (C_i) se obtiene a partir del coste del material correspondiente a los valores comerciales (C_a) y del espesor de los distintos materiales aislantes estudiados (e_a), ecuación (1).

$$C_i = C_a \cdot e_a \quad (1)$$

Cabe destacar que no todos los materiales tienen paneles aislantes con variación de 1 cm, no obstante se han considerado todos los espesores para obtener el espesor óptimo y comprobar si los espesores comerciales coinciden con los más económicos y eficientes.

Los elementos constructivos analizados corresponden a las fachadas de fábrica vista, con el aislamiento térmico por el interior, habiendo un total de 17 fachadas en el catálogo de elementos constructivos del CTE (IETCC, 2016). Siendo la transmitancia térmica (U) función de la resistencia térmica del cerramiento sin aislante (R_{sin}) y de la resistencia térmica de la capa aislante (R_a), ecuación (2):

$$U = \frac{1}{(R_{sin} + R_a)} \quad (2)$$

Figura 1: Catálogo de elementos constructivos del CTE. Fachadas F 1.1 y F 1.3

Codigo	Sección (mm)	Datos entrada		HS ⁽¹⁾	HE ⁽²⁾
		HP	RM	GI	U (W/m ² K)
F 1.1		J1	N1	2	1/(0,54+R _{AT})
		J2	N2	3 ⁽²⁾	
		-	B3	5	
F 1.3 ⁽⁸⁾		J1	N1	2	1/(0,42+R _{AT})
		J2	N2	3 ⁽²⁾	
		-	B3	5	

En el caso objeto de análisis, para las fachadas F1.1 y F1.3 se establece un valor de resistencia térmica sin considerar el aislamiento térmico (R_{sin}) cuyo valor es 0.54 m²K/W y 0.42 m²K/W respectivamente según se indica en la figura 1.

El CTE en su Documento Básico de Ahorro de Energía en la Exigencia HE-1 establece la transmitancia térmica máxima (U_{max}) para la fachada en la zona climática B de Valencia de 1 W/m²K y una transmitancia límite de muros (U_{Mlim}) de 0.82 W/m²K.

A partir de la transmitancia límite de muros, al ser el valor más restrictivo, se obtiene el espesor mínimo de aislante (e_{amin}) necesario para los distintos materiales aislantes empleados. Esta cuantía determina un mínimo de validez para los espesores óptimos que se obtienen en el desarrollo de este artículo.

Los resultados se obtienen con la ecuación (3).

$$e_{a \min} = \left[\frac{1}{U_{Mlim}} - R_{sin} \right] \cdot \lambda_a \quad (3)$$

Por supuesto este valor está en función de la conductividad térmica (λ_a) del aislante térmico considerado. En la tabla 3 se resumen los espesores de aislante térmico mínimo para cada una de las soluciones del catálogo con los aislantes térmicos considerados.

Tabla 3. Espesor mínimo de aislante ea min (mm) en la zona climática B3 en las fachadas F1.1 a F1.17 según el material aislante empleado.

Fachada	EPS-1	EPS-2	EPS-3	XPS-2	XPS-6	PU-1	PU-2
F1.1	26.50	24.46	23.78	23.78	23.10	15.63	14.27
F1.2	19.87	18.34	17.83	17.83	17.32	11.72	10.70
F1.3	31.18	28.78	27.98	27.98	27.18	18.39	16.79
F1.4	25.33	23.38	22.73	22.73	22.08	14.94	13.64
F1.5	19.87	18.34	17.83	17.83	17.32	11.72	10.70
F1.6	13.24	12.22	11.88	11.88	11.54	7.81	7.13
F1.7	24.94	23.02	22.38	22.38	21.74	14.71	13.43
F1.8	19.09	17.62	17.13	17.13	16.64	11.26	10.28
F1.9	26.11	24.10	23.43	23.43	22.76	15.40	14.06
F1.10	19.48	17.98	17.48	17.48	16.98	11.49	10.49
F1.11	21.82	20.14	19.58	19.58	19.02	12.87	11.75
F1.12	30.79	28.42	27.63	27.63	26.84	18.16	16.58
F1.13	24.94	23.02	22.38	22.38	21.74	14.71	13.43
F1.14	31.57	29.14	28.33	28.33	27.52	18.62	17.00
F1.15	24.94	23.02	22.38	22.38	21.74	14.71	13.43
F1.16	33.91	31.30	30.43	30.43	29.56	20.00	18.26
F1.17	28.06	25.90	25.18	25.18	24.46	16.55	15.11
Máximo	33.91	31.30	30.43	30.43	29.56	20.00	18.26
Mínimo	13.24	12.22	11.88	11.88	11.54	7.81	7.13

3.2 Energía transmitida a través del cerramiento.

La energía transmitida a través del muro se ha cuantificado mediante el programa TRNSYS. Se ha obtenido la energía anual transferida a través del elemento constructivo para cada tipo de cerramiento analizado (F1.1 y F1.3), orientación (norte y sur) y aislante térmico (EPS-1, EPS-2, EPS-3, XPS-2, PU-1 y PU-2) con la variación del espesor del aislante.

La definición del modelo en TRNSYS se ha realizado considerando un volumen climatizado de 6x6m en planta y 3 metros de altura. Este volumen tiene todos los cerramientos opacos, evitando así las ganancias térmicas solares, y se ha considerado toda la envolvente adiabática excepto un cerramiento al exterior. Las condiciones de confort interior para verano e invierno se establecen según el CTE HE-4 Apéndice para uso residencial con fuente interna baja y las temperaturas exteriores y los datos meteorológicos considerados se han obtenido de la base de datos climáticos (Meteonorm, 2007).

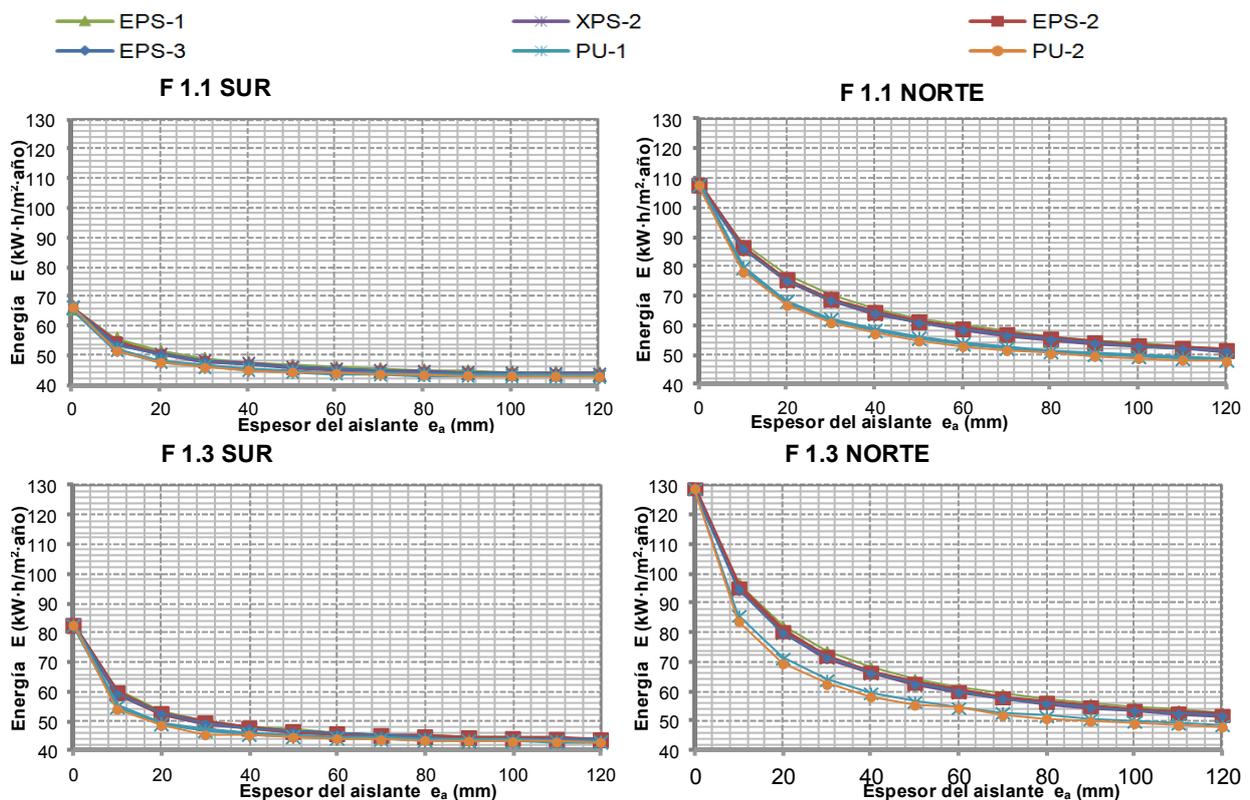
Tabla 4. Temperaturas de trabajo en Valencia

Mes	T ^a interior media (°C)	T ^a exterior media (°C)	Mes	T ^a interior media (°C)	T ^a exterior media (°C)
Enero	20	10.97	Julio	23	24.42
Febrero	20	11.62	Agosto	23	24.94
Marzo	20	13.58	Septiembre	23	22.42
Abril	20	15.02	Octubre	20	18.81
Mayo	20	18.41	Noviembre	20	14.31
Junio	23	21.23	Diciembre	20	11.83

El tiempo de funcionamiento diario se establece en 24 horas.

El estudio energético proporciona la energía perdida o ganada a través del muro de forma anual por unidad de superficie para cada uno de los casos de estudio obteniéndose las ecuaciones modelizadas de la energía consumida en función del espesor del material aislante.

Figura 2: Flujo de energía anual E (kW·h/m²·año) vs. Espesor aislante e_a(mm), según el tipo de fachada, orientación y aislamiento.



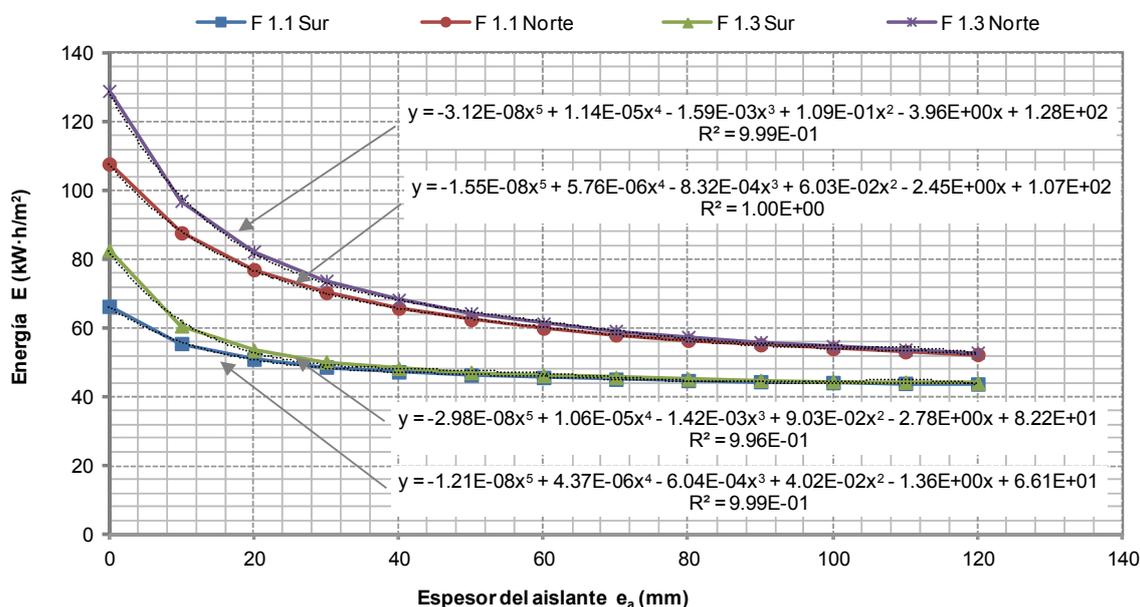
En la figura 2 se resumen los datos obtenidos de energía que atraviesa el muro según el tipo constructivo seleccionado y el espesor de aislamiento térmico. En este resumen se aprecia que el flujo de calor varía según la orientación y que a medida que se aumenta el espesor

del aislamiento térmico la energía que atraviesa el muro es muy similar para ambas orientaciones, independientemente de la solución constructiva.

También se aprecia que la solución constructiva tiene más importancia cuando el aislamiento térmico es menor, siendo mayor la pendiente en la solución constructiva F1.3 que en la F1.1, tanto para la orientación sur como para la norte.

Se realiza la modelización matemática de los resultados de la energía anual con respecto a un rango de espesor del material aislante entre 0 y 120 mm, con ecuaciones polinómicas de quinto orden que presentan coeficientes de correlación superiores al 98%. En la figura 3 se representa la ecuación polinómica para las distintas fachadas y orientaciones cuando utilizamos como aislante térmico el EPS-1. Esta modelización se realiza para los distintos materiales aislantes analizados.

Figura 3: ·Energía anual E (kW·h/m²·año) vs. Espesor aislante e_a(mm). EPS-1.



El flujo de energía a través del muro presenta una tendencia descendente a medida que aumenta el espesor del aislante. Este descenso es muy importante para pequeños espesores pero se observa que con espesores elevados tiende a no producirse una reducción significativa de energía que atraviesa el muro. Esto implica que aunque aumente el espesor del aislamiento térmico las pérdidas de energía se mantienen constantes.

3.3 Coste total

Puesto que lo que obtenemos con TRNSYS es la energía que atraviesa el muro, sin considerar la eficiencia de los equipos de climatización, si se quiere relacionar este dato al coste de consumo energético tenemos que aplicarle el factor de rendimiento.

El coste total (C_t) corresponde al coste de inversión del material aislante (C_i) según el espesor utilizado y el coste energético de funcionamiento (C_e) equivalente al consumo energético considerando que la eficiencia de los equipos de climatización es del 30%. Y para un tiempo de estudio de 10 años.

Coste total por unidad de superficie viene dado por la ecuación (4):

$$C_t = C_i + C_e \quad (4)$$

3.4 Espesor óptimo del material aislante.

Para determinar el espesor óptimo, el método de cálculo más utilizado se basa en la aplicación del valor actualizado neto, VAN (Iglesias 2014). En este caso, se debe determinar, para cada inversión en aislamiento, el valor actualizado neto del ahorro energético aportado y compararlo con el incremento que supone la inversión. Para determinar el VAN, se aplica el coeficiente multiplicador (ecuación 5) que actualiza el ahorro en el periodo total que se considere.

$$\text{Coef. VAN} = \frac{m(m^t - 1)}{m - 1} \quad (5)$$

$$m = \frac{1 + 0.01 \cdot b}{1 + 0.01 \cdot r} \quad (6)$$

Para un tiempo de estudio $t = 10$ años se estima un aumento previsible del coste de la energía $b = 5\%$ y una tasa de actualización neta, equivalente al interés bancario deducidos los impuestos y la inflación, $r = 2\%$, obteniéndose un Coef. VAN de 11.77.

A cada espesor de aislamiento le corresponderán unas pérdidas energéticas específicas y un coste de inversión asociado. A medida que aumente el espesor, disminuyen las pérdidas energéticas y aumentan la inversión. Si se consideran dos espesores consecutivos, la diferencia de pérdidas energéticas tendrá un valor económico que se actualiza con el Coef. VAN para el periodo de estudio, y a su vez existirá una diferencia de inversión. El espesor óptimo económico representa el equilibrio, es decir, cuando el incremento del ahorro es igual al incremento de la inversión.

La ecuación (7) permite el cálculo del coste total para cada espesor de aislante.

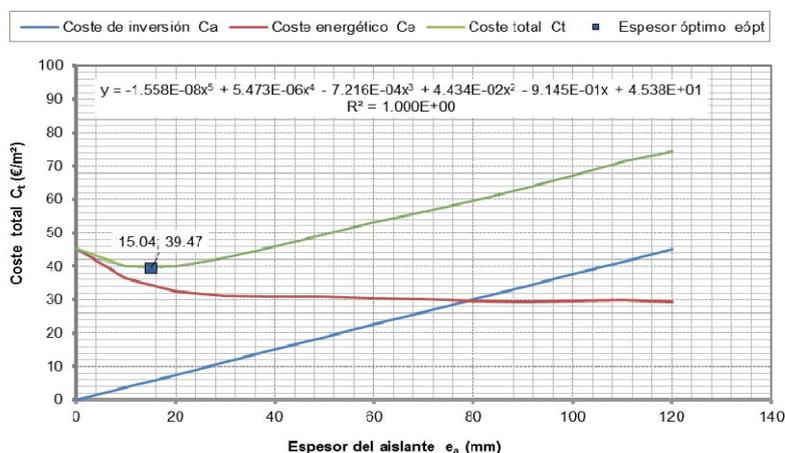
$$C_t = C_a \cdot e_a + E_{\text{consumida}} \cdot \left(\frac{E_{\text{térmica}}}{E_{\text{eléctrica}}} \right) \cdot T_E \cdot \text{Coef. VAN} \quad (7)$$

El coste energético es el coste eléctrico equivalente de la energía transmitida a través del cerramiento teniendo en cuenta el rendimiento de los equipos. La tarifa eléctrica (T_E) está referida al mes de enero de 2016 de 0.195056 €/kW·h incluido el impuesto sobre la electricidad (IMP) de 5.7% y el IVA del 21%.

Los resultados del coste total de la ecuación (7) respecto de cada espesor se ha modelizado mediante la ecuación (8) con valores de $R^2 > 0.99$.

$$C_t = a \cdot e_a^5 + b \cdot e_a^4 + c \cdot e_a^3 + d \cdot e_a^2 + e \cdot e_a + f \quad (8)$$

Figura 4: Coste total C_t (€/m²) vs. Espesor del aislante e_a (mm) para $t = 10$ años. PU-2. F1.1. Sur.



El método de cálculo directo (Andima, 1990) permite encontrar el espesor óptimo económico derivando la ecuación (8) con respecto al espesor del material aislante, ecuación (9).

$$\frac{\partial C_t}{\partial e_a} = 0 \quad (9)$$

Figura 5: Coste total C_t (€/m²) vs. Espesor del aislante e_a (mm) para t=10 años. PU-2.

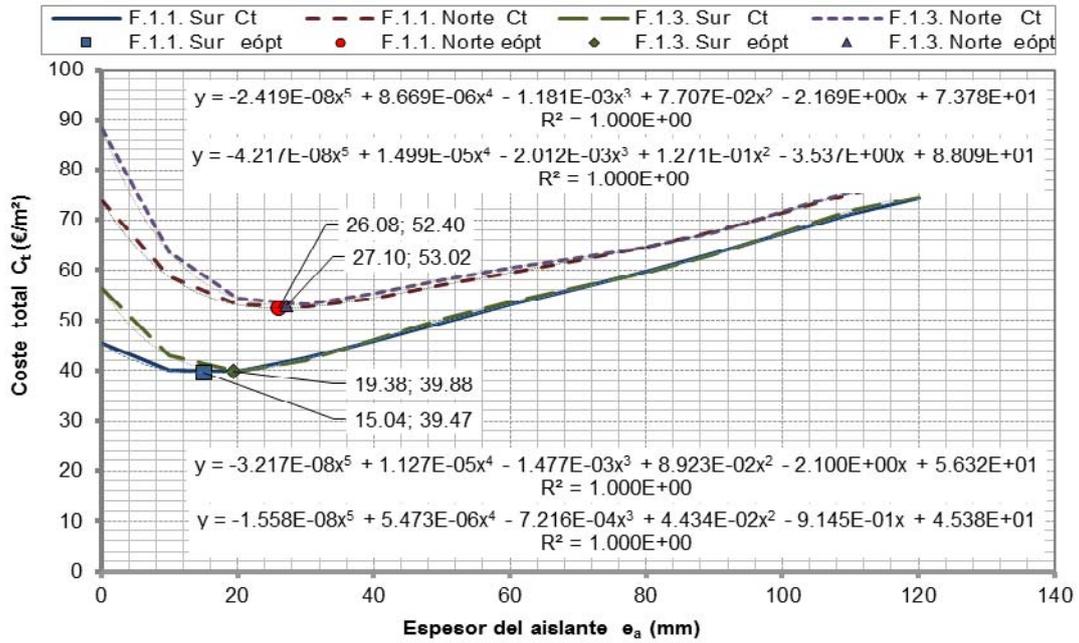
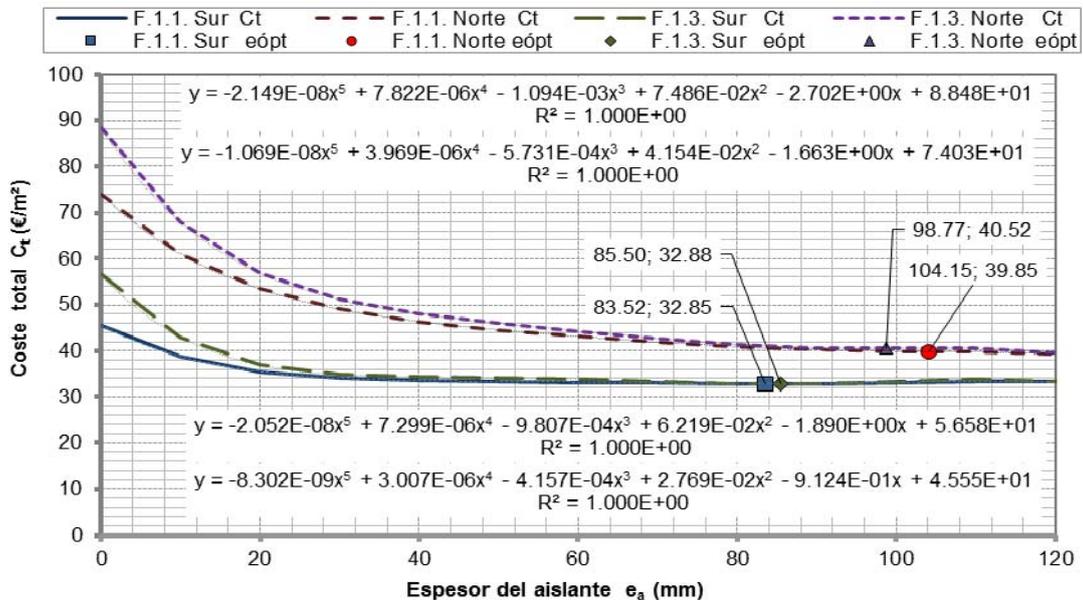


Figura 6: Coste total C_t (€/m²) vs. Espesor del aislante e_a (mm) para t=10 años. EPS-1.



En la figura 5 y 6 se muestra la evolución del coste total que presenta un valor mínimo correspondiente a la espesor óptimo para el aislante PU-2 y EPS-1 respectivamente en cada uno de los cerramientos y orientaciones. Este mismo estudio se ha realizado para los seis materiales aislantes combinados con los dos tipos de fachadas y las dos orientaciones.

4. Resultados

Los resultados del estudio de los distintos materiales aislantes, fachadas y orientaciones del espesor óptimo y el coste mínimo se indican en la tabla 5.

Tabla 5. Espesor óptimo e_{opt} (mm) y Coste total mínimo $C_{t \text{ min}}$ (€/m²). Zona B3 y t=10 años.

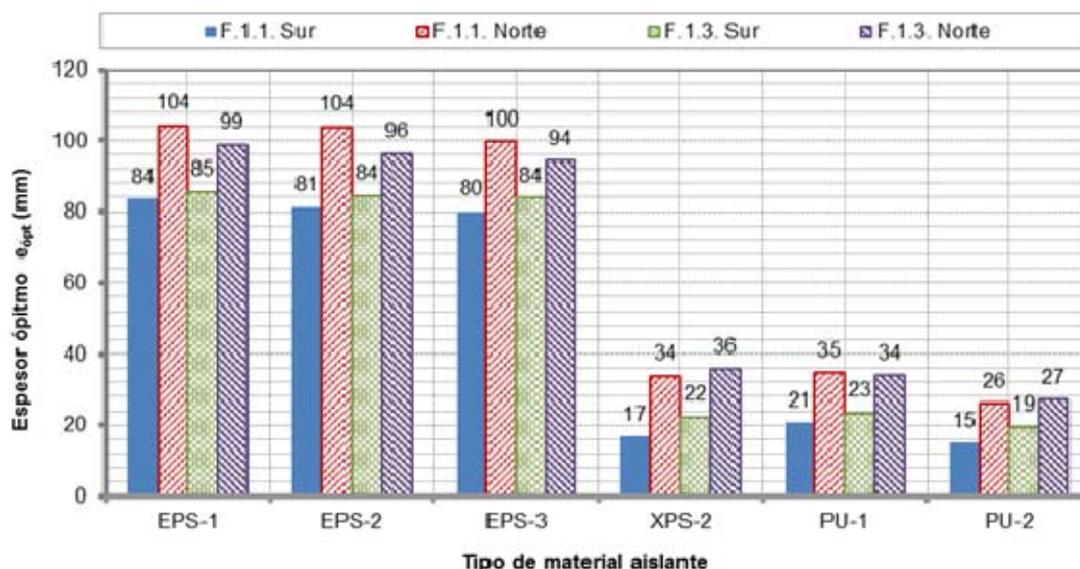
Fachada	Parámetro	EPS-1	EPS-2	EPS-3	XPS-2	PU-1	PU-2
F.1.1 Sur	e_{opt} (mm)	83.52	81.21	80.05	16.79	20.67	15.04
	$C_{t \text{ min}}$ (€/m ²)	32.85	33.01	33.35	39.95	36.86	39.47
F1.1 Norte	e_{opt} (mm)	104.15	103.80	99.77	33.74	34.79	26.08
	$C_{t \text{ min}}$ (€/m ²)	39.85	39.76	40.21	55.58	48.33	52.40
F1.3 Sur	e_{opt} (mm)	85.50	84.48	83.93	22.27	23.30	19.38
	$C_{t \text{ min}}$ (€/m ²)	32.88	33.00	33.24	41.34	36.98	39.88
F1.3 Norte	e_{opt} (mm)	98.77	96.34	94.32	35.72	33.97	27.10
	$C_{t \text{ min}}$ (€/m ²)	40.52	40.26	40.56	57.12	49.04	53.02

Los espesores óptimos oscilan entre 15.04 mm (PU-2, F1.1. Sur) y 104.15 mm (EPS-1, F1.1 Norte).

4.1 Influencia del tipo de aislante en el espesor óptimo y coste mínimo.

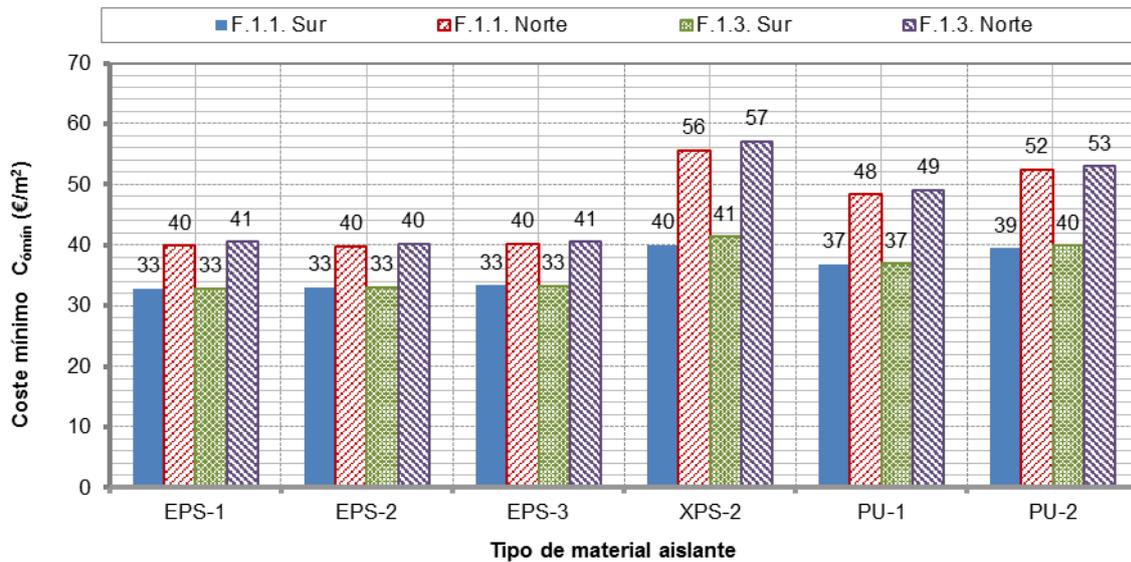
El material utilizado como aislamiento térmico debe ser seleccionado según los criterios de eficiencia energética. El espesor del material aislante es importante a la hora de ejecutar la fachada ya que cuanto menor sea el espesor menos superficie de vivienda tendremos que ocupar para su instalación. En la figura 7 se resumen los resultados de espesor óptimo dependiendo del material, orientación y tipo de fachada. Gráficamente se aprecia cómo el aislamiento EPS requiere un espesor mucho mayor para conseguir un resultado óptimo.

Figura 7. Espesor óptimo del aislante e_{opt} (mm).



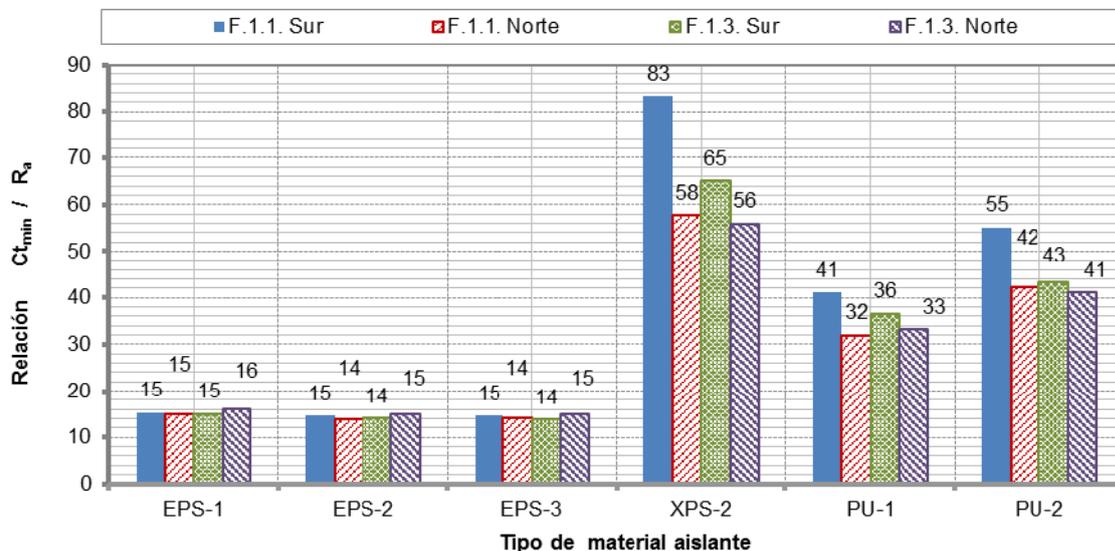
En la figura 8 se aprecia el coste total que se obtiene según el tipo de aislamiento térmico, fachada y orientación. En este caso los resultados se invierten con respecto al anterior ya que el material EPS es el que reduce al máximo los costes, aunque esta diferencia es menor para las fachadas orientadas a sur y aumenta considerablemente con las fachadas norte, siendo el XPS el material con mayor coste.

Figura 8. Coste total mínimo $C_{t\min}$ ($\text{€}/\text{m}^2\cdot\text{año}$).



También se ha obtenido la relación entre el coste total mínimo producido en relación con la resistencia térmica que aporta para cada solución constructiva. Los resultados se representan en la figura 9 y se aprecia con claridad que el material XPS es el más costoso y el EPS el menor, en relación al carácter aislante que proporciona teniendo mayor influencia la orientación y la solución constructiva que el resto de materiales.

Figura 9. Relación $C_{t\min} / R_a$ (e_{opt}/λ) vs. Tipo de aislante.



La variación del espesor óptimo con respecto al valor mínimo para una misma solución constructiva y orientación, oscila entre un 264% y un 455%, siendo el mayor el EPS-1 y el menor el PU-2 (tabla 6). Cabe destacar que existe mayor variación en las fachadas sur que en las norte. Este se explica en que las fachadas norte requieren mayor cuantía de espesor de aislante y como se ha visto en la figura 2 con grandes espesores la tendencia descendente de la energía transmitida va disminuyendo hasta que no es significativa.

Tabla 6. Influencia del tipo de material aislante.

Orientación	EPS-1	EPS-2	EPS-3	XPS-2	PU-1	PU-2	Variación
F1.1. Sur	84	81	80	17	21	15	455%
F1.1. Norte	104	104	100	34	35	26	299%
F1.3. Sur	85	84	84	22	23	19	341%
F1.3. Norte	99	96	94	36	34	27	264%

4.2 Influencia de la orientación de la fachada en el espesor óptimo.

En las gráficas se aprecia la diferencia según la orientación de la fachada, esta variación del espesor respecto del mínimo oscila entre un 25% y 101% en la F1.1 y entre un 12% y un 60% en la F1.3 (tabla 7). La orientación influye más que el tipo de solución constructiva. En este sentido, la fachada sur tiene el mejor comportamiento térmico, menor consumo de energía y requiere menor espesor de aislamiento.

Tabla 7. Influencia de la orientación de la fachada.

Orientación	EPS-1	EPS-2	EPS-3	XPS-2	PU-1	PU-2	Orientación	EPS-1	EPS-2	EPS-3	XPS-2	PU-1	PU-2
F1.1. Sur	84	81	80	17	21	15	F1.3. Sur	85	84	84	22	23	19
F1.1. Norte	104	104	100	34	35	26	F1.3. Norte	99	96	94	36	34	27
Variación	25%	28%	25%	101%	68%	73%	Variación	16%	14%	12%	60%	46%	40%

4.3 Influencia del tipo de fachada en el espesor óptimo.

El tipo de fachada no proporciona diferencias significativas, esta variación respecto del menor espesor puede oscilar entre un 2 y un 29% (Sur) y entre un 2 y 7% (Norte), tabla 8.

Tabla 8. Influencia del tipo de fachada.

Fachada	EPS-1	EPS-2	EPS-3	XPS-2	PU-1	PU-2	Fachada	EPS-1	EPS-2	EPS-3	XPS-2	PU-1	PU-2
F1.1. Sur	84	81	80	17	21	15	F1.1. Norte	104	104	100	34	35	26
F1.3. Sur	85	84	84	22	23	19	F1.3. Norte	99	96	94	36	34	27
Variación	2%	4%	5%	33%	13%	29%	Variación	5%	7%	5%	6%	2%	4%

5. Conclusiones

El espesor del aislamiento térmico influye de forma directa en el confort interior y en el consumo de energía necesario para conseguir los parámetros de confort. En este trabajo se ha analizado el flujo de calor a través de distintos cerramientos, evitándonos así introducir modelos reales de viviendas. Así, el espesor óptimo de aislamiento térmico según el tipo de material empleado, la solución constructiva y la orientación es lo que se ha tenido en cuenta en el presente trabajo.

En los resultados se aprecia que la inversión en el aislamiento térmico es importante, ya que la decisión del material a emplear afecta al coste de inversión, al espesor óptimo del aislante térmico y al coste energético que se produce en el periodo de estudio de 10 años.

El espesor del material a emplear es el primer factor analizado en la figura 4, y se aprecia que el EPS requiere el mayor espesor de todos los materiales analizados. Este dato es muy interesante ya que reducir el espesor es primordial para aumentar la superficie útil de los espacios. Los menores espesores se han conseguido con el PU-2.

Sin embargo, cuando se analiza el coste mínimo que se produce según el aislamiento térmico (empleado para el espesor óptimo), se observa que el menor coste corresponde al EPS. Esto es debido a que el precio del material EPS es mucho menor que el resto de materiales aislantes.

El tipo de material aislante es la variable más importante en el espesor óptimo ya que presenta la mayor variabilidad, de 264 a 455%. En segundo lugar la orientación de la fachada es determinante a la hora de seleccionar el material aislante y el espesor con variaciones del 12% al 101%. En todos los resultados el espesor siempre es mayor en la fachada norte. Y la tercera variable de decisión es la solución constructiva para los casos analizados (2 a 29%). La solución constructiva F1.1 requiere mayor coste que el resto de soluciones de fachada. Este efecto se ve muy disminuido con el EPS como material aislante.

6. Referencias

- Andima (1990). *El aislamiento en la industria y en la edificación: manual de consulta*. Madrid: ANDIMA, D.L.
- Código Técnico de la Edificación (CTE), Ministerio de Ciencia e Innovación, Gobierno de España, 2006.
- España. Poliespor. [Internet]. Soluciones Constructivas. [consultado 16 enero 2016]. Disponible en: http://www.poliespor.com/wp-content/uploads/2015/07/Poliespor_productos.pdf.
- España. Ursa. Productos. [Internet]. [consultado 16 enero 2016]. Disponible en: <http://www.ursa.es/es-es/productos/ursa-xps/ursa-xps-rq/Paginas/informacion.aspx>.
- España. Poliuretanos. Productos. Planchas y bloques. [Internet]. [consultado 16 enero 2016]. Disponible en: <http://www.poliuretanos.com/productos/planchas/purd35.html>.
- IETCC. Catálogo de Elementos Constructivos del CTE. [consultado 13 abril 2016]. Disponible en: http://www.codigotecnico.org/images/stories/pdf/aplicaciones/nCatalog_infoEConstr/CAT-EC-v06.3_marzo_10.pdf
- Iglesias Placed, C. (2014). Estudio sobre posible amortización y cálculo de ahorro generado en la rehabilitación de la envolvente de edificios de viviendas mediante intervenciones bioclimáticas. *12º Congreso Nacional del Medio Ambiente*, Madrid.
- Izquierdo, M., Gavira Galocha, M. J., Alfaro, J. A., & Lecuona Neumann, A. (2005). Espesor óptimo del aislante térmico para las viviendas de Madrid. *Actas 1ª Jornadas de investigación en construcción*, Madrid, pp.1175-1182.
- Meteonorm, version 6.0 e handbook part I-software. 2007.
- TRNSYS, A Transient System Simulation Program, Version 16. University of Wisconsin, 2004. Available from: <http://sel.me.wisc.edu/trnsys/>.