

PROPUESTA DE MATERIAL MULTICAPA AISLANTE DE BAJO COSTO E IMPACTO AMBIENTAL

Luis Juanicó^{1,a} y Alejandro D. González^{1,b}

- a) Centro Atómico Bariloche e Instituto Balseiro (CAB-IB), Bariloche.
E-mail: Juanico@cab.cnea.gov.ar
- b) Instituto Andino-Patagónico de Tecnologías Biológicas y Geoambientales (IPATEC), CONICET y Universidad Nacional del Comahue, 8400 Bariloche, Río Negro. E-mail: gonzalezad@comahue-conicet.gob.ar

Recibido 09/08/16, aceptado 08/10/16

RESUMEN: El objetivo de este trabajo es mostrar las ventajas térmicas, ambientales y económicas, de un nuevo material compuesto propuesto para aislación térmica en viviendas. Se propone un sobre muro exterior que intercala varias cámaras de aire y capas de aislantes de baja emisividad infrarroja. Se desarrolla un modelo de resistencias térmicas unidimensional para calcular la transferencia de calor multimodal involucrada (conducción, convección y radiación), la cual se resuelve mediante iteración numérica. Como ejemplo, empleando 5cm de EPS (telgopor) en multicapas de 1 cm y cámaras de aire de 2cm, se obtiene una resistencia térmica similar a una capa sólida de EPS de 10 cm, dando un coeficiente global de transmisión de 0,346 W/m²°K. Se compara también la energía y los gases de efecto invernadero en la fabricación y el transporte del EPS, y se evalúan sus costos y aspectos constructivos.

Palabras clave: Aislación térmica, Propiedades físicas, Impacto ambiental

INTRODUCCIÓN

La mejora térmica de la envolvente de los edificios es un tema que ha sido ampliamente estudiado en nuestro país, y por supuesto tiene su correlato a nivel mundial, donde se cuenta con 40 años de desarrollo. Vale aquí y ahora la comparación, en este momento especial en que la sociedad se ha movilizó por el “tarifazo energético”, porque la situación local (con casas de malísima aislación térmica y con usuarios acostumbrados a disfrutar de muy buenas climatizaciones pagando tarifas fuertemente subsidiadas) tiene su correlato con la situación internacional de 40 años atrás. Allí, luego de ambas crisis del petróleo (73’ y 79’) el barril de petróleo multiplicó su valor por 10 (pasando de 3 a 30 dólares), generando una crisis que fue afrontada con estrictas reglamentaciones relativas al confort (por ej., la recordada “sixty-five degrees”, 65°F ≈ 18°C, del presidente norteamericano James Carter) que fueron eficaces para resolver la coyuntura. El consumo energético en climatización representa una cantidad importante de energía en países desarrollados, y en Argentina, aproximadamente la mitad del consumo global. En aquel entonces en Estados Unidos (al igual que hoy en Argentina), el bajar de 24°C a 18°C la calefacción permitió reducir a cerca de la mitad este consumo. Una vez así resuelto el problema acuciante, los países desarrollados han venido trabajando fuertemente a lo largo de estos 40

¹ Investigador Independiente CONICET

años en mejorar la aislación térmica de las viviendas para mantener bajo consumo pero con condiciones de confort más altas, por lo general de 22°C a 24°C. En nuestro país el avance en esta temática ha sido prácticamente nulo. Por ejemplo, en un trabajo estadístico comparativo, se ha observado que el consumo anual en calefacción de casas en Bariloche era entre tres y cuatro veces mayor al de Suecia, con exigencia climática similar (González, 2008). Frente a este problema, la única solución sustentable es seguir el camino de los países desarrollados: la “rehabilitación” térmica de edificios.

En la evaluación de impacto ambiental de un edificio se distinguen dos etapas relevantes: 1) la fase constructiva; 2) la fase operativa. La primera tiene en cuenta los impactos en la extracción y procesamiento de la materia prima para la fabricación, los transportes y el trabajo en obra para la utilización final de los materiales de construcción. En la segunda el principal componente es la energía usada en la operación del edificio. La importancia relativa de una y otra fase depende fuertemente de la calidad térmica de la envolvente. Si la calidad térmica es baja y la energía usada en calefacción y refrigeración es alta, entonces los impactos de la fase operativa superan en poco tiempo a los incurridos en la construcción. Por el contrario, y que es tema de preocupación al presente, cuando se mejoran los indicadores térmicos de las envolventes, el consumo operacional disminuye significativamente y comienza a tener importancia el ahorro de energía y gases de efecto invernadero (GEI) en la obtención, transporte y procesamiento de los materiales (Azari et al., 2016; González, 2014).

Los aislantes térmicos son materiales de baja densidad. Se necesitan grandes volúmenes para alcanzar altos índices de eficiencia de la envolvente. En zonas muy frías, como por ejemplo en Bariloche, con espesores de aislamientos de 10 a 20 cm, los volúmenes de aislante pueden ser similares a los de los muros estructurales. El transporte resulta entonces en un costo significativo, y además el impacto en energía y GEI puede resultar mayor que en otros materiales usados en estructuras y muros. Esta preocupación se manifiesta, por ejemplo, en la obtención de las nuevas placas de EPS gris, que aumentan su resistencia térmica en cerca del 30% con la inclusión de grafito en su interior. Este material resulta de mayor costo que el EPS regular, pero la ventaja principal para su elección radica en la disminución de materia prima y transporte para obtener el mismo efecto aislante (BASF, 2016). Esta disminución de material usado contribuye a la sustentabilidad en la provisión de aislantes. Otro intento por aumentar la resistencia térmica y bajar la cantidad de material usado condujo a la manufactura de paneles aislantes con vacío (Brunner et al., 2014), los cuales son muy costosos y requieren de tecnologías especiales para su fabricación y colocación.

En esta dirección, y con el objetivo de proveer una solución eficiente, y a la vez económica y de bajo impacto ambiental, diseñamos un conjunto térmico que se basa en EPS y cámaras de aire. El conjunto incluye placas planas de EPS intercaladas y formando cámaras de aire estancas. Como veremos luego en detalle, este sistema aislante así compuesto aumenta significativamente la resistencia térmica del material base (EPS) al combinar su conocida baja conductividad con su (no tan conocida) baja emisividad infrarroja (0.6), lo cual permite minimizar la transmisión de calor por radiación en las cavidades de aire interpuestas, un factor clave para el aumento de resistencia térmica global. En las próximas secciones se explica la metodología para el análisis térmico y para el impacto en energía y GEI, se presentan los diseños y resultados y se evalúa el costo colocado en Bariloche por unidad de aislamiento térmico.

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción del material propuesto

Se trata de un conjunto de placas de EPS de 1 cm de espesor separados por 2 cm de aire, colocados en forma sucesiva. Para el estudio de caso presentado aquí proponemos 5 capas de aislante y 5 de aire, como muestra la Figura 1.

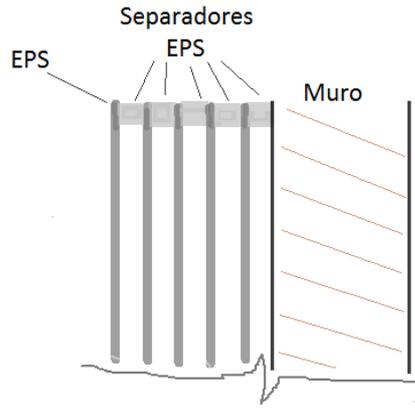


Fig. 1 Esquema del conjunto aislante

Los separadores son también de EPS, de 2 cm de espesor y de largo adecuado a la aplicación. El espesor total del conjunto es de 15 cm. Escapa a los objetivos de este estudio las variantes de fijación e instalación del revestimientos. De todos modos, puede fijarse de diversas formas, entre las cuales puede mencionarse por ejemplo la fijación con tornillos pasantes fijados al muro (Screwfix, 2016; Screwuk, 2016), y a los cuales se fija el revestimiento. A los fines de la comparación entre el conjunto aislante propuesto y el convencional de EPS macizo, asumimos que pueden instalarse con las mismas fijaciones.

Principios físicos de la transmisión del calor en múltiples cavidades y capas aislantes

Es conocido el efecto aislante que proporciona una cámara de aire estanca, utilizado ampliamente por ejemplo en las ventanas con doble vidrio hermético (DVH). Su espesor (e) se define a fin de minimizar la transferencia de calor conjunta por conducción y convección. El criterio general es aumentar el espesor a fin de reducir el flujo de calor conducido, q''_{cond} (Eq. 1) aprovechando la baja conductividad del aire ($k=0,024$ W/m°C), pero sin que sea significativa la transmisión por celdas de convección, q''_{conv} , la cual aumenta según el espesor al cubo (Incropera, 2011). Este óptimo se alcanza cuando el número adimensional de Nusselt (Nu) es igual a la unidad, condición para la cual la resistencia térmica de convección ($R_{conv}=1/h$) es igual a la resistencia de conducción ($R_{cond}=e/k$). Para un salto térmico entre el interior y el exterior de una vivienda en invierno promedio ($\sim 22^\circ\text{C}$) este óptimo se establece en 13mm aproximadamente (condición para la cual el número de Rayleigh (Eq. 4) de la cavidad es $\sim 10^4$), siendo éste el espesor más comúnmente adoptado en DVH. Sin embargo y como veremos luego en nuestro cálculo detallado, para un sistema como el propuesto en el cual el salto térmico global se salva a través de varias capas y por ende el salto térmico en cada cavidad sea sensiblemente inferior, es factible el empleo de espesores mayores de aire manteniendo el criterio anterior ($Nu=1$), obteniendo así mejores aislaciones.

$$q''_{cond} = k \Delta T_{EPS} / e \quad (1)$$

siendo ΔT_{EPS} el salto de temperatura entre ambas caras del sólido (EPS) considerado. Por otro lado:

$$q''_{conv} = h \Delta T_{cav} \quad (2)$$

siendo ΔT_{cav} el salto de temperatura en ambas caras de la cavidad considerada, y donde el coeficiente de convección h (W/m²°C) se calcula a través de su forma adimensional ($Nu = h e/k$) para una cavidad vertical esbelta de altura H formada entre dos placas laterales isothermas (T_1 y T_2) según:

$$Nu = 0,42 Ra^{1/4} Pr^{0,012} (H/e)^{-0,3} \quad (3)$$

donde Pr es el número adimensional de Prandtl del aire bajo las condiciones medias del problema (presión y temperatura) y donde Ra es el número adimensional de Rayleigh (similar al número de

Reynolds pero para flujos de convección natural), el cual define el tipo de flujo (sin convección, con flujo laminar o turbulento), calculado como:

$$Ra = g \beta (T_1 - T_2) e^3 Pr / \nu^2 \quad (4)$$

Donde $g = 9,81 \text{ m/s}^2$, $\beta = 1/T$ (en grados K) es el módulo de compresibilidad y ν la viscosidad cinemática del aire, ambos evaluados a la temperatura media en la cavidad. Es relevante remarcar que la correlación anterior de convección (Eq. 3) vale para cámaras de relación de esbeltez H/e de entre 10 y 40. En las geometrías aquí propuestas se obtendrán relaciones H/e mayores a 40; siendo que el efecto del término H/e satura para relaciones mayores a 40, hemos fijado aquí $H/e = 40$ en estos casos. También es remarcable que esta correlación es válida para un rango de Ra entre 10^4 y 10^7 ; para valores menores no se producen corrientes convectivas y la correlación (Ec. 3) arrojaría erróneamente valores del Nu menores a la unidad (siendo que $Nu=1$ corresponde a conducción pura) y por lo tanto corresponde fijar $Nu=1$.

Por otro lado y en paralelo a esta transferencia de conducción-convección (ver esquema Figura 2), dentro de la cavidad se produce una transferencia por radiación térmica entre las dos paredes de EPS a diferentes temperaturas (T_1 , T_2), entre las cuales se establecen múltiples reflexiones y absorciones además de la propia emisión térmica infrarroja.

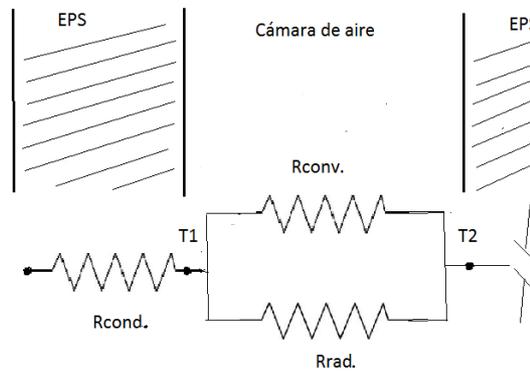


Figura 2: esquema de resistencias térmicas en la capa aislante

Siendo conocida la emisividad de cada superficie interviniente (ϵ_1 , ϵ_2), el flujo de calor transmitido por radiación infrarroja (q''_{rad}) efectivamente establecida entre dos placas paralelas se puede calcular como de radiación de cuerpo gris con una cierta emisividad efectiva ($\epsilon_{efectiva}$) (Incropera, 2011), según las Ec. (5-6):

$$\epsilon_{efectiva} = 1 / (1/\epsilon_1 + 1/\epsilon_2 - 1) \quad (5)$$

$$q''_{rad} = \epsilon_{efectiva} \sigma (T_1^4 - T_2^4) \quad (6)$$

donde $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$ es la constante de Stefan-Boltzmann. Finalmente, dada la conservación de la energía, sabemos que el flujo de calor a través de cada capa aislante (q''_{EPS}) es igual a la suma de los dos flujos de calor establecidos dentro de cada cavidad adyacente, siendo entonces:

$$q''_{EPS} = q''_{cav} = q''_{conv} + q''_{rad} \quad (7)$$

Para el sistema propuesto en la figura 1 se fijan condiciones de contorno: la temperatura del ambiente exterior (T_e), y la temperatura de la cara interior del sistema aislante (T_i). Se establece así un sistema de 9 ecuaciones similares a la Ec.7 (igualando una capa de material sólido EPS y la consecutiva cavidad, o viceversa) que cuenta con nueve temperaturas (sobre todas las caras internas) como incógnitas (T_1 , T_2 , T_9). Resolver analíticamente este sistema de ecuaciones es prácticamente

imposible debido al carácter no lineal de las mismas, introducido por el término de radiación. En vez de esto, emplearemos un método de iteración numérico programable en hoja de cálculo, para resolver este problema.

Resolución numérica

Comenzamos por fijar valores para todas las propiedades termofísicas del aire involucradas: Pr , β , ν , k , siendo aproximadas (en todas las cámaras) por su valor a una temperatura promedio ($T_m=(T_i+T_e)/2$) y presión atmosférica. Bajo esta hipótesis razonable (variaciones del 5% en las propiedades), el problema se vuelve “simétrico” y el salto de temperaturas en todos los sólidos aislantes es igual y lo mismo vale para todas las cavidades, con lo cual el sistema general anterior de 9 temperaturas incógnitas se reduce a sólo estos dos saltos de temperatura (ΔT_{EPS} y ΔT_{cav}), relacionados entre sí por la condición de contorno entre ambos extremos:

$$T_i - T_e = N (\Delta T_{EPS} + \Delta T_{cav}) \quad (8)$$

Siendo N (=5 en este caso) el número de capas aislantes (y también de cavidades) interpuestas. Siendo así relacionados linealmente ambos saltos térmicos en una única incógnita (llámese, x), la ecuación a resolver numéricamente (planteando la conservación de la energía) es la igualación de los flujos de calor en ambos dominios del problema:

$$q''_{EPS}(x) = q''_{cav}(x) \quad (9)$$

Despejar esta ecuación mediante un método iterativo, implica siempre partir de una buena solución semilla, para lo cual asignaremos la solución de mayor simetría, es decir: $\Delta T_{EPS} = \Delta T_{cav} = \Delta T$, y de la ecuación (8) se despeja rápidamente $\Delta T=(T_i-T_e)/2N$. Conocido así el salto ΔT de una capa, se calculan todos los flujos de calor yendo a través de las ecuaciones (1-6) anteriores y se verifica que no se cumple el balance (Ec. 9). Para finalmente hallar por iteración la solución exacta, resta solamente explicitar la relación entre ambos saltos térmicos, de modo que uno aumente conforme el otro disminuye (utilizando la ec. 8) para poder definir uno de ellos como la variable a iterar (usando por ejemplo la función buscar objetivo en Excel) buscando como objetivo cumplir con el balance de energía (Ec. 9).

Para el caso en estudio, la Tabla 1 muestra los datos de entrada, la Tabla 2 los cálculos iniciales y la Tabla 3 los cálculos finales (corregidos por iteración), junto con los resultados globales obtenidos, representados por el coeficiente de transmisión de calor ($U=0,346 \text{ W/m}^2\text{°C}$). Si se pretendiera lograr este mismo valor mediante la solución “tradicional” (es decir, colocando una capa sólida de telgopor), se requiere colocar un espesor doble (10cm), el cual puede ser despejado fácilmente de igualar su resistencia térmica de conducción (e/k) a la resistencia global ($1/U$) en la Eq. 10. El ahorro de material obtenido con el sistema multicapa propuesto se traduce entonces en ahorro de costos y, (asociado a éste) de impacto ambiental.

$$R_{cond} = e / k_{EPS} = 1/U \quad (10)$$

Es interesante destacar que para el espesor propuesto de cavidades (2 cm) bajo las condiciones estudiadas, la convección se encuentra inhibida ($Nu = 0,95$) y se podría por lo tanto proyectar espesores mayores de forma de minimizar la transferencia por conducción-convección, tal como se muestra en la Tabla 4.

Se observa allí que el uso de cavidades menores al espesor óptimo ($\approx 2\text{cm}$) aumenta significativamente la potencia transmitida, y las cavidades mayores producen una reducción despreciable, siendo pues el espesor óptimo el recomendable en todos los casos.

Tabla 1. Datos de entrada.

Telgopor (EPS)		
Emisividad	0,6	#
Conductividad	0,035	W/m°C
Aire (cavidad)		
Conductividad	0,024	W/m°C
Difusividad térmica	1,40 E-5	m ² /s
Número de Prandtl	0,7344	#
Datos Geométricos		
Número placas EPS	5	#
Número cavidades	5	#
Espesor EPS	1	Cm
Espesor cavidad	2	Cm
H/e	40	#
Área muro perimetral	100	m ²
Datos térmicos		
T _i	21	°C
T _e	0	°C

Tabla 2. Cálculos iniciales (asumiendo $\Delta T_{EPS} = \Delta T_{cav}$).

ΔT	2,1	°C
Temp. promedio	10,5	°C
β (promedio)	0,00353	K ⁻¹
Número de Nusselt	0,95 (\rightarrow 1)	#
Número de Rayleigh	2.181	#
Potencia convección	126	W
ϵ_{equiv}	0,4286	#
Potencia radiación	470	W
Potencia total cavidad	722	W
Potencia conducción EPS	736	W

Tabla 3. Cálculos finales (convergencia numérica)

ΔT_{EPS}	2,12	°C
ΔT_{cav}	2,08	°C
Potencia convección	252	W
Potencia radiación	476	W
Potencia total cavidad	728	W
Potencia conducción	728	W
U global	0,346	W/m ² °C

Por otra parte, siendo que este óptimo depende fuertemente del número de capas aislantes utilizadas (al cambiar el salto térmico en cada cavidad), es también interesante realizar el estudio de sensibilidad considerando este parámetro, como se resume en la Tabla 5. Se observa allí fuertes reducciones en el coeficiente global de transmisión de calor, aunque (siendo que también se aumenta el número de capas de telgopor) a costa de mayores costos. Englobando este factor en nuestro enfoque, observamos que aumentar de 5 a 6 capas aislantes (un aumento del material del 20%) origina una similar reducción (18%) en la transmisión de calor.

Una mayor cantidad de capas interpuestas consigue mejorar la aislación, pero proporcionalmente con mayores costos e impactos ambientales.

Tabla 4. Análisis de sensibilidad del espesor de cavidades para el caso anterior ($N=5$)

Espesor cav. (cm)	Nu	U W/m ² °C	Reducc. U %
1,5	1	0,371	0
2,0	1	0,346	6,7
2,5	1,13	0,339	8,6
3,0	1,29	0,336	9,4
3,5	1,45	0,334	9,9

Tabla 5. Análisis de sensibilidad del N (con óptimo espesor cavidad, $Nu=1$)

N	Espesor cavidad (cm)	U W/m ² °C	Reducc. U %
4	2,0	0,434	-27
5	2,1	0,343	0
6	2,2	0,283	18
7	2,4	0,239	30
8	2,5	0,207	40
9	2,6	0,183	47

Impacto ambiental de los aislantes

La provisión de materiales de construcción presenta diversos impactos ambientales. En este trabajo focalizamos en energía utilizada y GEI emitidos al ambiente en las etapas de fabricación y transporte al sitio de obra. Como no contamos con datos locales de energía usada en fabricación de EPS, utilizaremos datos de otros autores. Consultamos las evaluaciones de ciclo de vida para manufactura de EPS de Harvey (2007) en Reino Unido, Anastaselos et al. (2009) en Grecia, Bribián et al. (2009) en España, Pargana et al. (2014) en Portugal; y Su et al. (2016) en China. La Tabla 6 resume los valores informados por estos autores.

Tabla 6: Energía y GEI para la fabricación de 1 kg de EPS

	Energía (MJ/kg EPS)	GEI (kgCO ₂ eq./kg EPS)
Harvey (2007)	145	9,3
Anastaselos et al. (2009)	80,8	3,5
Bribián et al. (2009)	117	17
Pargana et al. (2014)	142	6,2
Su et al. (2016)	85	6,3
Promedio de valores	114	8,5

Estas difieren en los impactos del uso de combustibles, matriz eléctrica propios de cada país, y método de desarrollo del inventario de ciclo de vida; por lo cual, por simplicidad, asumiremos aquí que el promedio dado por las cuatro fuentes es el mejor valor posible para asignarlo preliminarmente a la fabricación de EPS en Argentina.

Consideramos que el lugar a utilizar el material es la ciudad de Bariloche, y el transporte se realiza en camión semirremolque de dimensiones 14 m largo, 2,5 m ancho y altura de carga 2,5 m. El consumo de combustible promedio entre camino de llanura y de montaña para este vehículo es de alrededor de 0,49 litros diesel por km (IMAZ, 2011). Teniendo en cuenta un valor energético para el diesel 10% mayor por el transporte y distribución a estaciones de servicio, la energía por km recorrido del camión resulta 21,1 MJ/km, y los GEI 1,58 kgCO₂/km recorrido. Asumimos que la procedencia del EPS es (siendo ésta la más cercana) la fábrica Aislaciones Patagónicas SRL (APSRL, 2016), cercana a la ciudad de Neuquén, y distante 450 km del lugar de uso. Por kg de EPS, el transporte agrega un impacto en energía de 7,2 MJ/kgEPS, y en emisiones de GEI 0,54 kgCO₂/kgEPS.

Para el cálculo de costos se consultó con la empresa Novopor (2016) en la sucursal Bariloche. La placa de 1 cm de espesor en EPS de 15 kg/m^3 cuesta $\$30/\text{m}^2$, y la de 10 cm cuesta $\$300/\text{m}^2$, para la misma densidad. Para el multicapa se asumió que para garantizar la rigidez en la colocación, se pegan (con pegamento al agua) separadores de EPS de $1\text{cm} \times 2\text{cm}$, cada 50cm, es decir, en 1 m^2 se consideran 3 separadores de 1 m de largo, y entonces en las 5 capas se agregan 15 separadores de 1m de largo. En el cálculo de costo de la solución multicapa se suman entonces $0,30 \text{ m}^2$ de EPS de 1 cm de espesor para separadores, un estimado en $\$3$ en pegamento al agua, y $\$5$ de mano de obra para el pegado. En el cálculo de costo debe agregarse también un costo extra en la instalación, ya que la solución multicapa tiene un espesor final de 15 cm (10cm de cámaras de aire y 5cm de EPS), y el EPS macizo sólo 10cm. En el caso de que se utilice el sistema de pernos de varilla roscada en voladizo para fijación, la diferencia de costo es mínima, porque solamente se requiere un perno 5 cm más largo. Sin embargo, si se usan soportes es necesario contar perfiles de mayor dimensión. En base a los costos de perfiles metálicos livianos (como los usados para durlock), estimamos un costo adicional de instalación de $\$20/\text{m}^2$ para la solución multicapa, con lo cual, sumado a los separadores de EPS, el pegamento, la mano de obra de pegado, y los mayores soportes, a los fines de la comparación el costo total de la solución multicapa resulta en $\$178$.

La Tabla 7 muestra la comparación de cantidad de materia prima y energía utilizadas, GEI emitidos, y costo en Bariloche, para el aislante de 1 m^2 de pared, en las dos variantes que conducen a resistencia térmica similar, para el material propuesto aquí, multicapa de 5 capas, y para el reemplazo en EPS macizo de 10 cm de espesor. Por simplicidad no se considera el impacto del pegamento, que se asume mucho menor al del EPS.

Tabla 7: Comparación de uso de materia prima y energía, GEI emitidos, y costo para dos soluciones aislantes que proveen igual resistencia térmica.

	Peso (kg/m ²)	Energía usada (MJ/m ²)	GEI emitidos (kgCO ₂ /m ²)	Costo (\\$/m ²)
Multicapa de 5 espacios	0,79	96	7,2	178
EPS macizo de 10 cm	1,5	193	14	300

Se observa que la solución multicapa, con respecto al EPS macizo de igual transmitancia, utiliza el 53% de la materia prima y de energía, emite el 53% de los GEI, y su costo es el 59%.

CONCLUSIONES

El método numérico desarrollado es fácilmente programable en una hoja de cálculo, permitiendo calcular la aislación de diversos sistemas multicapas que incluyan una o más cavidades. Es interesante notar como el espesor óptimo de cavidades aumenta conforme aumenta el número de capas aislantes. Para una única cavidad (como un doble vidriado) es conocido su valor de 13mm, pero por ejemplo, para 5 de ellas aumenta a 2 cm, y a 2,6 cm para 9 cavidades. Esto es consecuencia de la distribución del salto de temperaturas entre las múltiples capas, lo que influye en los parámetros que caracterizan al flujo convectivo en las cámaras de aire (números de Rayleigh y de Nusselt). Habiéndose observado que el uso de espesores inferiores al óptimo conlleva un sensible detrimento de la aislación, es interesante destacar este comportamiento poco conocido a los efectos de diseñar cualquier sistema de aislación multicapa, siendo el método de cálculo propuesto extrapolable a otros casos.

El uso potencial de multicapas mayores al caso base estudiado (N=5) debe ser ponderado con el mayor impacto ambiental y de costos que esto conlleva, y al respecto se ha observado que éste se encuentra muy cerca del óptimo (entre 5 y 6 capas) para esta tipología. Este margen está naturalmente presente en toda propuesta de aislación (podemos ilustrarlo aquí, diciendo que siempre el “primer centímetro de telgopor” colocado será el que proporcione comparativamente el mayor beneficio), siendo por lo tanto muy útil conocerlo a los efectos de proponer una rehabilitación moderada de hogares preexistentes.

Por otra parte, este criterio no descarta en absoluto el uso de aislaciones de mejor calidad, que podrían plenamente justificarse en base a consideraciones económico-energéticas e incluso de solidaridad social (por ejemplo, la empresa distribuidora, Camuzzi Gas del Sur, no conecta nuevos usuarios en Bariloche desde hace un año por falta de capacidad de transporte en el gasoducto troncal), habiendo hoy una demanda insatisfecha equivalente a 3.000 familias.

En cuanto al flujo de calor transferido por radiación térmica infrarroja dentro de las cavidades, los resultados muestran que éste duplica al transferido por conducción-convección, y por lo tanto es sumamente importante emplear materiales de baja emisividad infrarroja para conformar las mismas. En este sentido el material seleccionado (EPS) presenta una gran ventaja respecto de la mayoría de los aislantes (lana de vidrio, espuma de polietileno, espuma de poliuretano, madera, etc.) que poseen una emisividad del orden de 0,9, frente a 0,6 del EPS.

Combinando ambos fenómenos de transferencia de calor antes estudiados, se concluye que sería posible mejorar el desempeño del sistema empleando capas más delgadas de EPS, lo cual reduciría el costo e impacto ambiental asociados. Siendo que el espesor seleccionado (1 cm) es el mínimo normalmente asequible, esta sugerencia es impracticable. No obstante el razonamiento nos conduce a pensar el uso de otros materiales de bajo costo que se provean en láminas más delgadas (y de mayor resistencia mecánica). Siendo que podemos aquí permitirnos salir del universo de los materiales aislantes, toda vez que haremos recaer el mayor esfuerzo aislante a las propias cavidades, aparecen otras opciones potenciales, dignas de ser estudiadas a futuro. Proponemos por ejemplo el uso de láminas de MDF (un material de bajo impacto ambiental) de 3mm de espesor, pintadas con pintura normal de aluminio ($\epsilon=0,5$) o de oro ($\epsilon=0,4$).

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo ha sido financiado por el proyecto CONICET PIP 11220130100048CO “Uso eficiente de energía y aprovechamiento del recurso solar en la Patagonia Andina”; y por el proyecto de la Universidad Nacional del Comahue PIN I B191 “Medioambiente y sociedad: peligros naturales y vulnerabilidad en poblaciones de Patagonia Andina”.

REFERENCIAS

- Anastaselos D., E. Giama, A. Papadopoulos, An assessment tool for the energy, economic and environmental evaluation of thermal insulation solutions, *Energy and Buildings* 41 (11) (2009) 1165–1171
- Basf (2016). Graphite polystyrene GPS. <http://www.neopor.basf.us/performance/>
- Bribián I.Z., A.A. Usón, S. Scarpellini, Life cycle assessment in buildings: State-of-the-art and simplified LCA methodology as a complement for building certification, *Building and Environment* 44 (12) (2009) 2510–2520
- Brunner S., Wakili K.G., Stahl T., Binder B. (2014). Vacuum insulation panels for building applications: continuous challenges and developments. *Energy and Buildings* 85, 592-596
- González A.D. (2014). La importancia de la construcción eficiente en la Patagonia. Desde La Patagonia Difundiendo Saberes vol. 11, n°18, pp. 38-45
- González A.D. (2008). Aumento de la eficiencia térmica en la ciudad de Bariloche: Propuesta de plan de mejoras con dirección de subsidios a la inversión, y no al consumo. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* 12, 07.57-07.64
- Harvey L.D.D., Net climatic impact of solid foam insulation produced with halo-carbon and non-halocarbon blowing agents, *Building and Environment* 42 (8)(2007) 2860–2879.
- Incropera, F. P. y DeWitt, D. P. (2011). *Fundamentals of heat and mass transfer*, 7th edition, John Wiley. ISBN 978-0-470-91323-9
- IMAZ, 2011. Empresa de Transporte Imaz Bariloche. Comunicación por e-mail.
- Novopor (2016). Distribuidora de EPS en Bariloche. Consulta telefónica 28/7/2016.

- Pargana N., Pinheiro M.D., Silvestre J.D., de Brito J. (2014). Comparative environmental life cycle assessment of thermal insulation materials of buildings. *Energy and Buildings* 82 466–481
- Screwfix (2016). <http://www.screwfix.com/p/rawlplug-long-expansion-hammer-in-insulation-fixings-160-x-10mm-250-pack/57658>
- Screwuk (2016). <http://www.ukfixings.net/Insulation-Fixing-with-F-G-Nail-10mm-x-150mm-Box-of-250.html>
- Su X. et al. (2016). Life cycle inventory comparison of different building insulation materials and uncertainty analysis. *Journal of Cleaner Production* 112 (2016) 275e281

ABSTRACT: The aim of this work is to demonstrate the thermal, economical and environmental advantages of a new thermal insulation design to improve dwellings' efficiency. An array consisting of several layers of air chambers separated by an insulation material of low infrared emissivity is proposed. The multimodal heat transfer (conduction, convection and radiation) is modeled by unidirectional thermal resistances, solving the coupled equations by numerical iteration. As an example, the calculations for an array with five layers of EPS of 1 cm thickness separated by 2cm-wide air chambers are developed. The result is a global thermal transmittance value of 0,346 W/m²°K, which is similar to the one obtained by a solid EPS insulation of 10 cm thickness. The energy used and the greenhouse gases emitted in the manufacturing and transport of the materials are also studied, as well as the cost of the alternatives and the installation possibilities.

Keywords: Thermal insulation, Physical properties, Environmental impact