

ESTUDIO ENERGÉTICO DE CUBIERTAS TRANSLÚCIDAS.¹

S. Flores Larsen² y G. Lesino³.

INENCO - Instituto de Investigaciones en Energías No Convencionales – U.N.Sa. - CONICET
Universidad Nacional de Salta
Avda. Bolivia 5150 – CP 4400 – Salta Capital - Argentina
Tel. 0387-4255424 – Fax 0387-4255489 e-mail: seflores@unsa.edu.ar

RESUMEN: En este trabajo se estudia la performance térmica de un conjunto de cubiertas translúcidas utilizadas en la construcción de edificios. Para ello se utilizan datos medidos de la transmitancia global de policarbonatos alveolares con perfiles geométricos y con recubrimientos selectivos diseñados para disminuir el ingreso de radiación. Se realiza un estudio de la energía transmitida por cada uno de ellos para un día de verano y otro de invierno en la ciudad de Salta. Finalmente, se calcula mes a mes la cantidad de energía diaria que transmiten los mismos y se la compara con otros materiales de uso más extendido (vidrio y policarbonato alveolar).

Palabras clave: cubiertas, policarbonato, acondicionamiento de edificios, acondicionamiento de verano.

INTRODUCCION

El consumo de energía para acondicionar térmicamente edificios y construcciones se ha visto notablemente incrementado durante las últimas décadas, por lo que se ha reforzado el estudio y desarrollo de tecnología tendiente a disminuir la cantidad de energía convencional requerida para acondicionar dichos ambientes. Dentro de este ámbito, han surgido empresas dedicadas a la fabricación de policarbonatos translúcidos con tratamientos especiales para controlar el ingreso de la radiación solar al interior de los edificios. Dichos tratamientos se engloban en dos grandes grupos: los tratamientos geométricos y los tratamientos selectivos. El primero de ellos consiste en controlar el ingreso de radiación mediante la modificación de la forma de las cubiertas, por ejemplo, utilizando perfiles del tipo triangular, cuyos pequeños prismas invertidos reflejan la radiación solar directa de verano y permiten mayor transmisión de luz y calor en invierno. Este tipo de materiales fue caracterizado en un trabajo previo (Flores Larsen et al., 2002). El segundo grupo controla el ingreso de energía al edificio mediante la aplicación en la cubierta de recubrimientos selectivos especiales opacos al infrarrojo cercano, en el cual se encuentra aproximadamente el 50% de la energía solar. Con estos recubrimientos se busca disminuir la transmisión de la radiación infrarroja sin afectar sustancialmente la transmisión de la radiación visible, de modo de obtener una iluminación agradable reduciendo la energía que ingresa al edificio. La elección de materiales de uno u otro grupo depende del costo, de las características técnicas de los mismos, del tipo de edificio, del uso que se le dará al mismo y de las características meteorológicas del lugar en que se encuentra ubicado.

La transmitancia de una cubierta homogénea de espesor e depende del ángulo de incidencia θ (ángulo entre la radiación y la normal a la cubierta). Si ésta posee nervaduras, como en el caso de los policarbonatos alveolares, además de una dependencia con el ángulo de incidencia existe una dependencia con el ángulo que forma la proyección de la radiación incidente con las nervaduras (ángulo azimutal). Es decir, la transmitancia de una cubierta depende de las propiedades ópticas del material, de factores geométricos como el espesor de la placa y la distancia entre las nervaduras que le dan rigidez a la misma, y de la geometría (ángulo de incidencia y azimut) de la radiación que incide sobre el material, la cual depende del día del año, la hora y la latitud del lugar. En este trabajo se describen las transmitancias de un conjunto de cubiertas y sus variaciones con el ángulo de incidencia y el azimut de la radiación. A continuación se calcula la energía transmitida por cada uno de ellas para un día de verano y otro de invierno en la ciudad de Salta. Finalmente, se calcula mes a mes la cantidad de energía diaria que transmite cada cubierta y se la compara con la energía transmitida por otros materiales de uso más extendido (vidrio y policarbonato alveolar común).

DEPENDENCIA DE LA TRANSMITANCIA CON LOS ÁNGULOS DE INCIDENCIA Y AZIMUT DE DISTINTAS CUBIERTAS TRANSLUCIDAS

1. Vidrio homogéneo y policarbonato alveolar común (4mm).

Cuando el material de la cubierta puede considerarse homogéneo, como en el caso de un vidrio, la absorción de la radiación se describe mediante la ley de Bouguer, que supone que la radiación absorbida es proporcional a la intensidad local y a la distancia que la radiación ha recorrido dentro del material. La constante de proporcionalidad se denomina *coeficiente de*

¹ Trabajo financiado por ANPCYT PICT 2000 N°13-09991 y por CIUNSa N°1088.

² Becaria de CONICET.

³ Investigadora de CONICET.

extinción, el cual varía entre 4m^{-1} para el vidrio claro y 32m^{-1} para vidrio verde oscuro. La dependencia de la transmitancia con el ángulo de incidencia ha sido ampliamente estudiada (Duffie y Beckman, 1991) y presenta el aspecto de la Figura 1: la disminución de la transmitancia al aumentar el ángulo de incidencia se debe a una mayor reflexión de la radiación incidente y a una mayor absorción de la radiación debido al aumento del camino óptico.

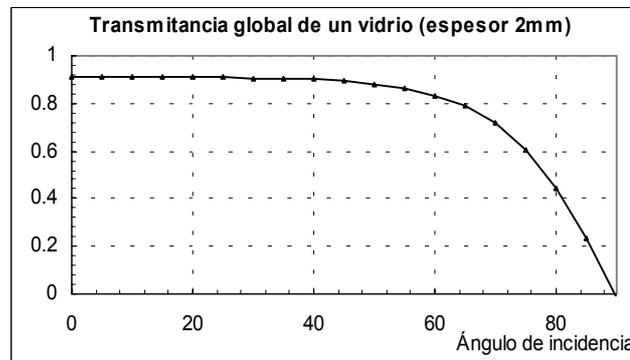


Figura 1: Transmitancia global de un vidrio (2mm de espesor, índice de refracción 1.526 y coeficiente de extinción 4m^{-1}).

El caso de policarbonatos alveolares es más complejo debido a que la transmitancia no sólo depende del ángulo de incidencia θ sino también del ángulo azimutal γ . Esta dependencia se debe a la presencia de las nervaduras que conectan las capas superior e inferior del material, con lo que la transmitancia del panel depende del número de nervaduras que atraviesa la radiación. Dicho número está directamente relacionado con el ángulo de incidencia, creciendo a medida que θ es más grande y provocando por lo tanto una disminución en la transmitancia de la cubierta. Existen trabajos realizados al respecto para policarbonatos alveolares y bialveolares de distinto espesor (Barral et al., 2001; Flores Larsen y Lesino, 2003), encontrándose que estudios realizados en placas con espesores de 6mm y 8mm no presentan variaciones sustanciales en la transmitancia (Perelló et al., 2001). Si se compara el policarbonato alveolar con el vidrio, se puede ver que en el primero se produce una disminución más pronunciada de la transmitancia con el ángulo de incidencia, debido a la cantidad de refracciones y reflexiones internas causadas por la presencia de las nervaduras. Para estudiar el comportamiento de estos materiales se realizaron medidas de la energía incidente y de la energía transmitida por las placas mediante un piranómetro LICOR Model LI-250, a distintos ángulos de incidencia y para azimuts de 0° y 90° . Los resultados para un panel de policarbonato alveolar de 4mm de espesor pueden analizarse en la Figura 2.

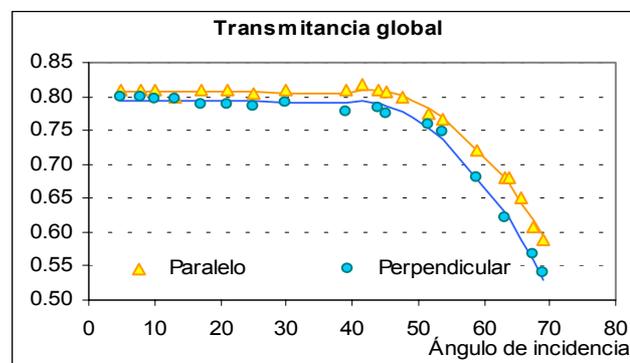


Figura 2: Transmitancia global de un panel de policarbonato alveolar (4mm de espesor).

2. Policarbonato alveolar con perfil geométrico

En el caso de policarbonatos con perfiles geométricos, al efecto de las nervaduras debe adicionarse el efecto del perfil triangular de la cara superior de la placa. Este diseño refleja una parte considerable de la radiación incidente cuando el ángulo de incidencia es pequeño, con lo que se busca contrarrestar el sobrecalentamiento y deslumbramiento en el interior del edificio a las horas de mayor radiación. Un estudio detallado se realizó con una muestra de Selectogal 10NGB35 y se encuentra en el trabajo de Flores Larsen et al. (2002).

Para un azimut de 90° en que los rayos solares son perpendiculares a las nervaduras, la placa trabaja de acuerdo a la geometría prevista por el fabricante y puede observarse la disminución de la transmitancia al disminuir el ángulo de incidencia (Figura 3). Cuando las nervaduras de la muestra son paralelas a la proyección del haz incidente (azimut de 0°), la transmitancia disminuye al aumentar el ángulo de incidencia debido a que el funcionamiento de los prismas no es el previsto por el fabricante. Es interesante observar que la transmitancia es en este caso aún más baja que cuando las nervaduras son perpendiculares al haz. Valores de la transmitancia para ángulos azimutales entre 0° y 90° se encuentran comprendidos entre ambas curvas, mientras que un estudio detallado de la variación con el ángulo azimutal se encuentra en Flores Larsen et al. (2002).

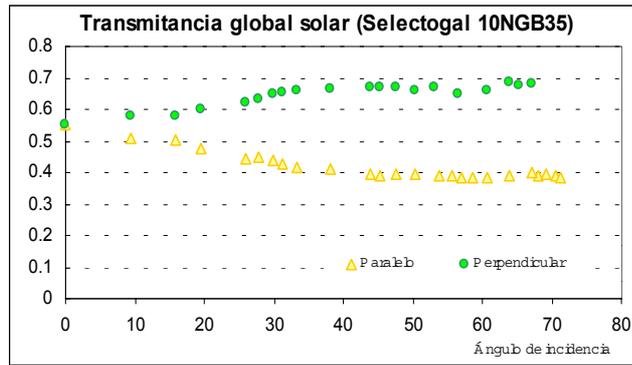


Figura 3: Transmitancia de una muestra de Selectogal 10NGB35 (policarbonato con perfiles geométricos) para distintos ángulos de incidencia y para las nervaduras de la muestra paralelas y perpendiculares a la proyección del haz incidente.

El comportamiento de este material se modelizó mediante ecuaciones que permiten calcular la transmitancia global solar τ en función del ángulo de incidencia y del azimut, para lo cual se aproximaron los valores medidos mediante rectas por tramos (método de los cuadrados mínimos). Para la variación con el ángulo de incidencia se utilizaron tres tramos (0° a 30° , 30° a 60° y 60° a 90°), mientras que para la variación con el azimut se precisaron cuatro tramos (0° a 10° , 10° a 20° , 20° a 30° y 30° a 90°). Las ecuaciones resultantes son las siguientes:

$$\tau(\gamma, \theta) = \begin{cases} \tau_{\text{paralela}, \theta} & 0 \leq \gamma < 10 \\ (0.01158 \gamma - 0.1158)(\tau_{\text{perpendicular}, \theta} - \tau_{\text{paralela}, \theta}) + \tau_{\text{paralela}, \theta} & 10 \leq \gamma < 20 \\ (0.04812 \gamma - 0.8466)(\tau_{\text{perpendicular}, \theta} - \tau_{\text{paralela}, \theta}) + \tau_{\text{paralela}, \theta} & 20 \leq \gamma < 30 \\ (0.0067 \gamma + 0.396)(\tau_{\text{perpendicular}, \theta} - \tau_{\text{paralela}, \theta}) + \tau_{\text{paralela}, \theta} & 30 \leq \gamma < 90 \end{cases} \quad (1)$$

en donde

$$\tau_{\text{paralela}, \theta} = \begin{cases} 0.5234 - 0.0033 \theta & 0 \leq \theta < 30 \\ 0.4512 - 0.0013 \theta & 30 \leq \theta < 60 \\ 0.4731 - 0.0015 \theta & 60 \leq \theta < 90 \end{cases}, \quad \tau_{\text{perpendicular}, \theta} = \begin{cases} 0.5166 + 0.0033 \theta & 0 \leq \theta < 30 \\ 0.5888 + 0.0013 \theta & 30 \leq \theta < 60 \\ 0.5669 + 0.0015 \theta & 60 \leq \theta < 90 \end{cases}$$

Estas ecuaciones se utilizan para generar el gráfico que se presenta en la Figura 4, en la que se puede analizar la transmitancia de una placa de Polygal Selectogal 10NGB35 en función de θ y γ . Se observa una variación pronunciada cuando γ varía entre 20° y 30° , lo cual coincide con las mediciones realizadas. Sobre dicha figura se han superpuesto cuatro conjuntos de datos que corresponden a un día de verano (21 de diciembre) y a un día de invierno (21 de junio) para la ciudad de Salta (latitud -24.85°). Para cada uno de estos días se calculó hora por hora el coeficiente global de transmisión de una placa horizontal con las nervaduras en sentido Norte-Sur y con las nervaduras en sentido Este-Oeste. Un análisis de los datos obtenidos lleva a concluir que la mejor posición de las placas es con las nervaduras en el sentido Este-Oeste, ya que presenta mayores coeficientes globales de transmisión en invierno y menores en verano que la Norte-Sur.

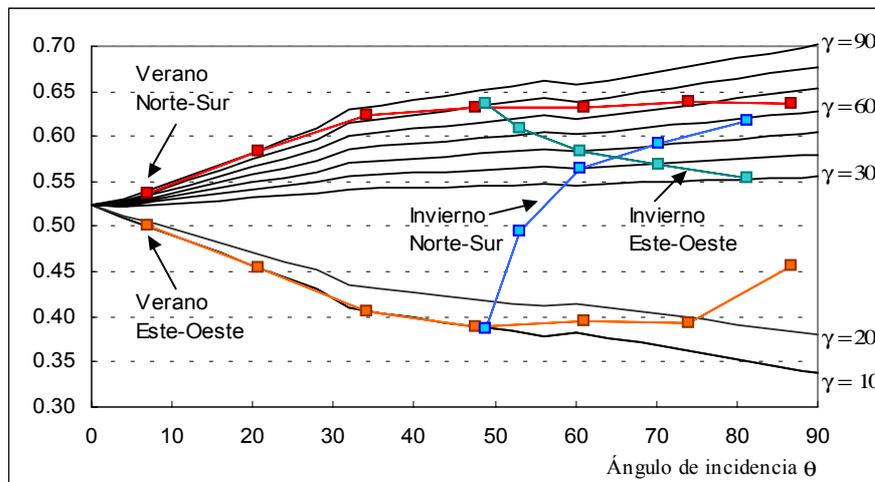


Figura 4: Transmitancia global solar para el 21 de diciembre (verano) y para el 21 de junio (invierno) con las nervaduras de la placa en sentido Norte-Sur y en sentido Este-Oeste (Selectogal 10NGB35).

3. Policarbonato alveolar con recubrimiento selectivo

Otro de los tratamientos que pueden realizarse sobre cubiertas para disminuir la carga térmica que ingresa a un edificio consiste en disminuir la transmitancia de la placa en el rango del infrarrojo, permitiendo al mismo tiempo el pasaje de luz visible. Se estudió una muestra de Polygal Primalite 16 PRL 27, de 16mm de espesor, 2.68 kg/m² de densidad superficial y estructura alveolar doble. La superficie exterior del material ha sido tratada mediante una pintura especial para filtrar el infrarrojo cercano, de 45µ de espesor. Esta capa está protegida por una capa externa que absorbe la radiación UV. La capa inferior es translúcida a efectos de favorecer la iluminación difusa. De la misma manera que en la muestra de Selectogal, las capas de este material van unidas entre sí por medio de nervaduras verticales espaciadas entre sí 20mm (Figura 5).

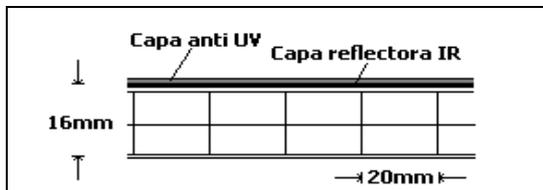


Figura 5: Corte transversal de una placa de Primalite 16mm.

En la Figura 6 se observa la transmitancia global solar medida para la muestra de Primalite 16PRL27 a distintos ángulos de incidencia y azimuts. Se observa que, a diferencia de lo que sucede con la muestra de Selectogal, la transmitancia del Primalite disminuye cuando el ángulo de incidencia se hace más grande. Es interesante observar que no aparecen diferencias sustanciales con respecto a la orientación de las nervaduras de la placa.

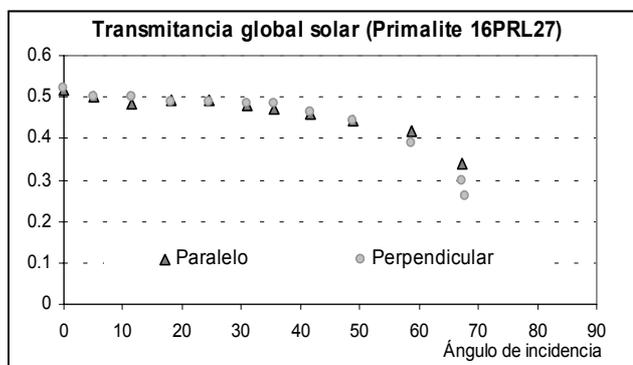


Figura 6: Transmitancia global solar de una muestra de Primalite 16PRL27 para distintos ángulos de incidencia y para las nervaduras de la muestra paralelas y perpendiculares a la proyección del haz incidente.

La modelización de este material se realizó mediante tramos rectos de la misma manera que para Selectogal. Las ecuaciones resultantes son las siguientes:

$$\tau(\theta) = \begin{cases} 0.5 & 0 \leq \theta < 30 \\ 0.5542 - 0.0023 \theta & 30 \leq \theta < 60 \\ 1.229 - 0.0143 \theta & 60 \leq \theta < 90 \end{cases} \quad (2)$$

Para un día del año y una posición de la cubierta determinados, deben calcularse hora por hora los ángulos de incidencia y azimutal de la radiación, con las ecuaciones (1) y (2) se calcula luego la transmitancia de las cubiertas para esa geometría y finalmente se determina la energía transmitida por el material a partir de la transmitancia y de la energía incidente.

COMPARACIÓN DE LA PERFORMANCE DE DISTINTOS TIPOS DE CUBIERTAS TRANSLUCIDAS

Para poder comparar la performance de las cubiertas estudiadas, se calculó hora por hora la radiación transmitida por cada una de ellas para un día de verano (21 de diciembre) y un día de invierno (21 de junio). Para el cálculo horario de radiación se utilizó el valor de radiación diaria media mensual y el modelo de Liu Jordan de cielo claro. Los resultados pueden verse en las Figuras 7 y 8. En un día de verano la placa de Selectogal 10NGB35 con sus nervaduras en dirección Este-Oeste y la placa de Primalite 16PRL27 son las que transmiten la menor cantidad de radiación, comportándose de manera semejante a un vidrio doble. El policarbonato alveolar de 4mm tiene y el vidrio simple son los materiales que transmiten la mayor cantidad de radiación, tanto en invierno como en verano. Es interesante observar que en invierno el Selectogal mejora su eficiencia respecto al Primalite, permitiendo un mayor ingreso de radiación.

La fracción de la energía incidente que atraviesa cada una de estas placas durante un día completo se puede analizar mes a mes en la Figura 9. En los meses cálidos las placa de Selectogal con orientación Este-Oeste y las de Primalite transmiten un 45% de la radiación incidente frente a un 60% de una placa con orientación Norte-Sur, un 76% de un policarbonato y un 85% de un vidrio simple de 3mm. En los meses fríos, la placa de Selectogal Este-Oeste transmite un 60% de la radiación

incidente, frente a un 50% de una placa Norte-Sur, un 68% de un policarbonato alveolar y un 83% de un vidrio simple de 3mm. En climas calurosos intermedios, en que es necesario cierto grado de calefacción en invierno, el material que más se adecua a la carga térmica requerida es la placa de Selectogal, que permite conseguir baja transmitancia en verano y mayor transmitancia en invierno. En el caso de climas calurosos en que en invierno no se requiere del uso de calefacción, tanto el Primalite como el Selectogal son buenas opciones.

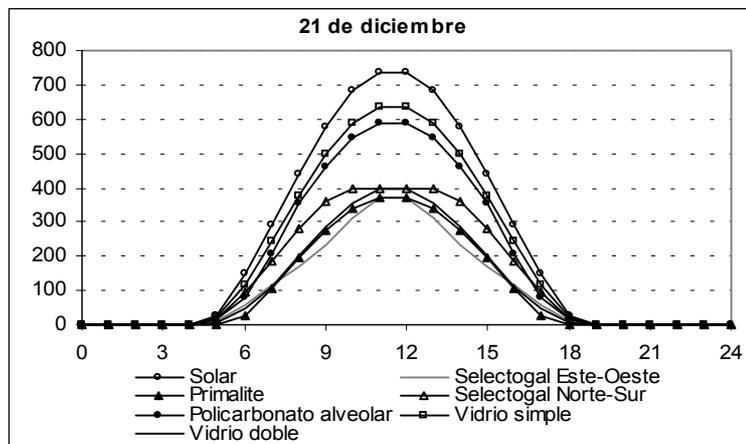


Figura 7: Radiación solar incidente y transmitida por distintos tipos de cubiertas para el día 21 de diciembre.

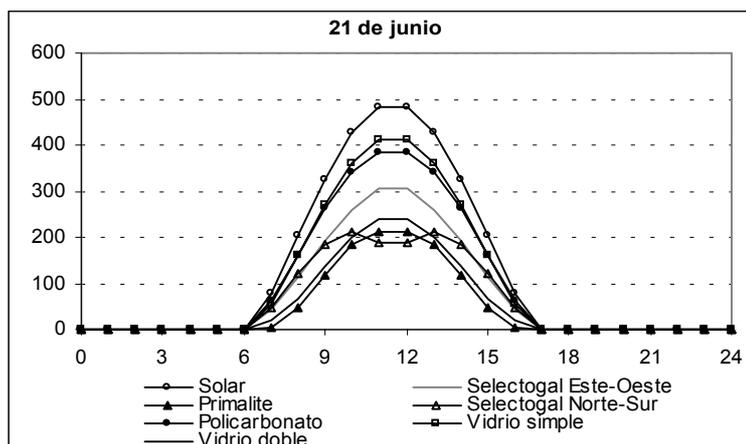


Figura 8: Radiación solar incidente y transmitida por distintos tipos de cubiertas para el día 21 de junio.

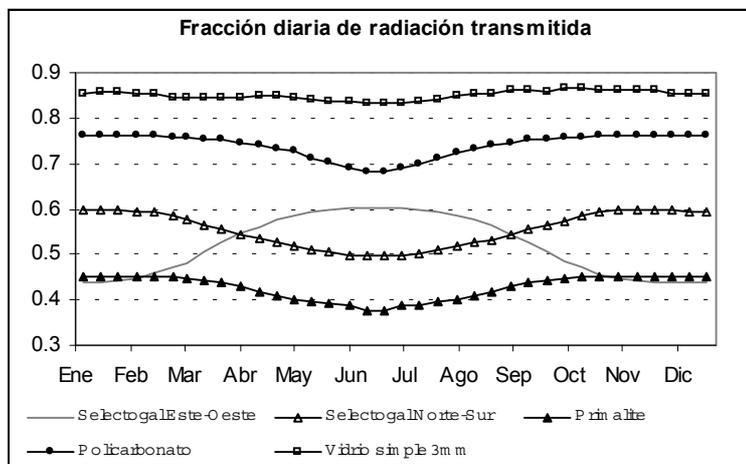


Figura 9: Fracción diaria de la energía transmitida por distintos tipos de cubiertas.

CONCLUSIONES

Las placas con perfiles geométricos y/o recubrimientos selectivos que disminuyen el ingreso de radiación en edificios son una alternativa interesante en su aplicación a climas calurosos con altos niveles de radiación. En el caso de policarbonatos con perfiles triangulares la orientación de las nervaduras con respecto a los rayos solares es de fundamental importancia, pudiendo disminuir hasta un 25% la efectividad de la placa si ésta se coloca en la dirección errónea. El efecto de los prismas consiste en un incremento de la transmitancia con el ángulo de incidencia, con lo que se obtiene buena transmisión de luz dentro del edificio en periodos invernales en que el sol se encuentra bajo, disminuyendo la cantidad de energía que ingresa al edificio cuando el sol incide con ángulos cercanos a la normal. De esta forma, se evitan el sobrecalentamiento y deslumbramiento en verano. En otros materiales translúcidos como policarbonato alveolar, vidrio y Primalite, la transmitancia se comporta de manera opuesta, disminuyendo con ángulos de incidencia grandes. Policarbonatos con tratamientos selectivos como el Primalite, se comportan en verano de manera semejante a los policarbonatos con tratamientos geométricos. La diferencia entre uno y otro radica principalmente en el comportamiento de invierno, puesto que la placa selectiva transmite un 38% de la energía solar incidente frente a un 60% de la placa con tratamiento geométrico.

Se ha incorporado al programa *SIMEDIF para Windows* un módulo que permite utilizar este tipo de materiales en la simulación del comportamiento térmico de edificios, para lo cual se utilizan las ecuaciones desarrolladas en este Capítulo. Con esta nueva incorporación es posible simular el ingreso de radiación a través de materiales translúcidos cuya transmitancia varía con el ángulo de incidencia y con el ángulo azimutal, como en el caso de policarbonatos alveolares, Primalite y Selectogal. También es posible incorporar nuevos materiales mediante el ingreso de sus transmitancias y de la variación de las mismas con el ángulo de incidencia.

Finalmente cabe hacer una observación con respecto a la disponibilidad de estos nuevos materiales: lamentablemente algunos insumos importados como las placas de Polygal prácticamente han desaparecido del mercado interno en el último año, con lo cual la aplicación directa de este tipo de materiales se ve en estos momentos obstaculizada por la situación económica del país.

REFERENCIAS

- Barral J., Morichetti, G., Galimberti P., Fasulo A. (2001). Evaluación de la energía solar absorbida por un colector acumulador integrado monotanque con cubiertas de policarbonato alveolar. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* 5, pp. 03.31-03.36.
- Braun J.BE. y Mitchell J.C. (1983). Solar Geometry for fixed and tracking surfaces. *Solar Energy* 31, 5, pp. 439-444.
- Chevalier J.L. (1988). Optical property measurements on advanced glazings. En *Actas de Conference on Solar Optical Materials 1988*, Oxford, Inglaterra, 12-13 Abril 1988, Pergamon Press.
- Duffie A. y Beckman W. (1991). *Solar Engineering of Thermal Processes*, John Wiley and Sons, Inc.
- Echazú R., Cadena C. y Saravia L. (2000). Estudio de materiales reflectivos para concentradores solares. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* 4, N°2, pp. 08.11-08.16.
- Flores Larsen S., Alanís E., Romero G. y Lesino G. (2002). Estudio de cubiertas transparentes con tratamientos geométricos para disminuir la carga térmica en el interior de edificios. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* 6, N°2, pp. 08.115-08.120.
- Flores Larsen S. y Lesino G. (2003). Performance of different translucent materials used in building covers. 20° Conference on Passive and Low Energy Architecture Conferences PLEA 2003. Santiago de Chile, 9 al 12 de noviembre de 2003. En *Prensa*.
- <http://www.licor.com> (fecha de consulta: 13 dic. 2002).
- <http://www.polygal.com> (fecha de consulta: 13 dic. 2002)
- Perelló D. y Fasulo A. (2001). Comparación de las transmitancias de policarbonato y vidrio. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* 5, pp. 08.143-08.148.

ABSTRACT: The thermal performance of translucent building covers was studied through the measured transmittance of angle selective and infrared selective polycarbonates designed to minimize the thermal load inside buildings. The results obtained in the calculation of the hourly transmitted energy for each cover, in a summer day and a winter day in Salta city, Argentina, are presented. The daily transmitted energy for an annual period is calculated and compared for a set of covers commonly used in building roofing.

Keywords: building covers, polycarbonate, summer conditioning.