

## **ESTUDIO DE CUBIERTAS TRANSPARENTES CON TRATAMIENTOS GEOMÉTRICOS PARA DISMINUIR LA CARGA TÉRMICA<sup>1</sup>**

**Silvana Flores Larsen<sup>2</sup>, Elvio Alanís, Graciela Romero y Graciela Lesino<sup>3</sup>**

**INENCO - Universidad Nacional de Salta – CONICET**

**GOL – Grupo de Óptica Láser – Dto. de Física - U.N.Sa.**

**Buenos Aires 177, (4400) - Salta - Argentina**

**Tel.: 54 387 4255578, Fax: 54 387 4255489**

**E-mail: seflores@unsa.edu.ar**

**RESUMEN:** En este trabajo se presentan los resultados de los estudios realizados sobre policarbonatos translúcidos que poseen diseños geométricos (perfiles con pequeños prismas tipos dientes de sierra) especialmente desarrollados para disminuir la carga térmica dentro de los edificios permitiendo al mismo tiempo una buena transmisión de luz para iluminación natural. Estos materiales están comenzando a utilizarse en cubiertas de invernaderos, shoppings, paseos, jardines de invierno, etc. Se utilizó un espectroradiómetro LICOR 1800 para estudiar la variación de la transmitancia visible de dichos materiales con la longitud de onda. Se estudió la variación puntual de la transmitancia a través de los prismas de la capa superior mediante tecnología laser y una placa de adquisición de datos conectada a una PC. Se realizaron mediciones para determinar las variaciones de la transmitancia visible con el ángulo de incidencia y el azimuth, comparándose los resultados obtenidos con los valores proporcionados por el fabricante.

### **PALABRAS CLAVE**

Cubiertas transparentes, transmitancia, policarbonatos, acondicionamiento de edificios.

### **INTRODUCCIÓN**

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 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. Uno de estos tratamientos, de naturaleza geométrica, consiste en utilizar en la tapa superior un perfil tipo dientes de sierra. Dichos dientes son pequeños prismas invertidos que reflejan la radiación solar directa de verano y permiten mayor transmisión de luz y calor en el invierno (un 50% de la energía solar está en el infrarrojo cercano). Por otro lado, existen tratamientos con recubrimientos selectivos especiales para disminuir al mínimo la transmisión de la radiación infrarroja sin afectar sustancialmente la transmisión de la radiación visible, de modo de permitir una iluminación agradable reduciendo la energía que ingresa al edificio. En el segundo grupo se estudiaron materiales con tratamientos superficiales de pinturas que son opacas al infrarrojo cercano.

En este trabajo se realiza un estudio de los materiales incluidos en el primer grupo. Debido a la naturaleza intrínsecamente geométrica del problema, se estudió la variación de la transmitancia con el ángulo de incidencia utilizando dos metodologías: por un lado se utilizó luz monocromática proveniente de un haz láser de HeNe de 10mW, cuya longitud de onda es 632.8nm. En este caso se emplearon dos geometrías de iluminación que se describen más adelante, midiéndose la intensidad luminosa incidente y transmitida con un fotodetector cuya señal es digitalizada y almacenada en una PC. Por otro lado se utilizó luz solar, efectuándose las mediciones con un espectroradiómetro a fin de estudiar la dependencia de la transmitancia con la longitud de onda en el rango comprendido entre los 380nm y los 780nm. A partir de estos datos se calculó la transmitancia visible de la placa, comparándose con los valores de fábrica para incidencia normal.

### **CUBIERTAS CON TRATAMIENTOS GEOMÉTRICOS**

En la Fig. 1 se puede observar un corte de una placa con selectividad geométrica. La capa exterior de la placa posee pequeños prismas que devuelven gran parte de la radiación directa cuando el ángulo de incidencia es pequeño (en verano) y una buena transmisión de luz y calor con ángulos de incidencia grandes (en invierno). De esta manera, se consiguen ahorros considerables en la cantidad de energía convencional utilizada para acondicionar los ambientes. La placa posee tratamiento anti UV y es prácticamente opaca al infrarrojo lejano.

<sup>1</sup> Trabajo financiado por CIUNSa. y por ANPCYT PICT 2000-13-09991

<sup>2</sup> Becaria de CONICET.

<sup>3</sup> Investigadora de CONICET.

El material estudiado en este trabajo es una muestra de Polygal Selectogal 10NGB35, de 10mm de espesor y  $2,6 \text{ kg/m}^2$  de densidad superficial. El material tiene dos capas, la superior con los prismas esquematizados en la Fig. 1 y la inferior translúcida para favorecer la iluminación difusa. Estas capas van unidas entre sí por medio de nervaduras verticales con un espaciado entre ellas de 11mm. Algunas de sus características técnicas pueden observarse en la Tabla 1. El valor proporcionado por la fábrica para la transmitancia visible a incidencia normal de este material es 0.143: la transmitancia visible de un policarbonato común del mismo espesor es del orden de 0.75, con lo que se puede ver la importante cantidad de luz directa que es reflejada hacia el exterior evitando el sobrecalentamiento excesivo en el edificio durante los periodos de alta radiación.

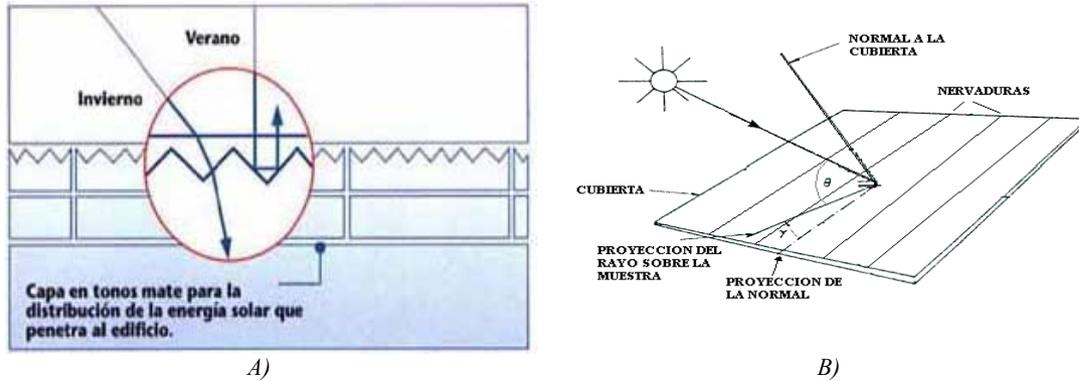


Fig. 1: A) Corte de una placa con selectividad geométrica. B) Ángulo de incidencia  $\theta$  y ángulo azimuthal  $\gamma$

Tabla 1: características técnicas de una placa de Polygal Selectogal 10NGB35 de 10mm de espesor.

$T_{solar}$	$R_{solar}$	$T_{visible}$	$R_{visible}$	$SHGC$	$U \text{ (W/m}^2\text{°C)}$	$K_{eff}$	$LT \text{ (%)}$
0.209	0.528 (ext) / 0.315 (int)	0.143	0.550 (ext) / 0.349 (int)	0.26	3.00	0.056	35

$T_{solar}$ : transmitancia solar (200nm-2500nm) de la placa a incidencia normal.  
 $R_{solar}$ : reflectancia solar (200nm-2500nm) de la superficie externa (hacia el ambiente exterior) e interna (hacia el local).  
 $T_{visible}$ : transmitancia visible (380nm – 780 nm) de la placa a incidencia normal.  
 $R_{visible}$ : reflectancia visible (380nm – 780 nm) de la superficie externa (hacia el ambiente exterior) e interna (hacia el local).  
 $SHGC$ : coeficiente de ganancia solar, es el cociente de la radiación solar transmitida a través de la placa y la radiación solar incidente. Tiene en cuenta los efectos conductivos, convectivos y radiativos.  
 $U$ : coeficiente global de pérdida ( $\text{W/m}^2\text{°C}$ ), medido de acuerdo a la norma ASTM C236.  
 $K_{eff}$ : conductividad térmica efectiva de la placa ( $\text{W/m}^2\text{°C}$ ).  
 $LT$ : transmisión de luz (%), medida de acuerdo a la norma ASTM D1003.

## EXPERIENCIAS CON LUZ LASER

El efecto producido en incidencia normal por los prismas invertidos de la capa superior es la reflexión de un gran porcentaje de la radiación directa que incide sobre la placa. Para cuantificar este efecto se diseñó una experiencia consistente en montar una muestra de Polygal Selectogal 10NGB35, de 8cm x 10cm y 10mm de espesor, sobre un microposicionador que la desplaza a velocidad constante, de acuerdo al esquema presentado en la Fig. 2. Un delgado haz láser incide perpendicular a la placa y a la dirección de desplazamiento, efectuando un barrido horizontal a lo largo de la misma. Detrás de la muestra, enfrente al haz incidente, se colocó un fotodetector LaserOptics LOM020 de 2mm de diámetro conectado a una PC mediante una placa de adquisición de datos DataTraslation DT2801 y se midió la radiación incidente y cada 0.02mm la radiación transmitida. La velocidad del microposicionador fue de 2mm/s y la frecuencia de toma de datos de 100Hz. Los resultados obtenidos en esta experiencia pueden verse en la Fig. 3.

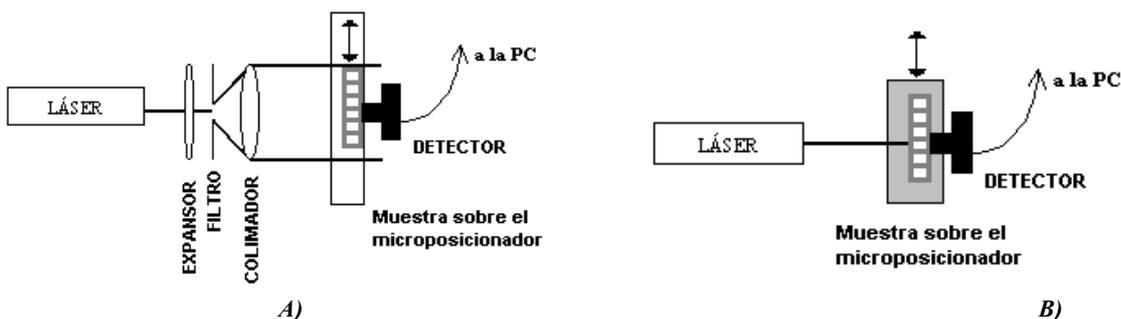


Fig. 2: vista en planta del montaje de la experiencia. A) Haz expandido. B) Haz delgado.

En dicha figura se puede observar que existen siete mínimos equiespaciados a una distancia promedio de 1.44mm y a continuación un intervalo mayor de 2.16mm de tamaño. Estos siete mínimos corresponden a los prismas que existen entre dos nervaduras (ver Fig. 1), mientras que los 2.16mm corresponden al tamaño de la nervadura. Esta experiencia es muy ilustrativa para analizar puntualmente la transmitancia de la placa: a incidencia normal los prismas reducen la transmitancia de la placa, funcionando como un pequeño sistema de espejos cóncavos que reflejan hacia el exterior la radiación directa que incide sobre ellos. Este efecto puntual de cada prisma contribuye a disminuir la transmitancia global de la placa, transformándose en un método excelente para disminuir la cantidad de radiación que atraviesa la misma.

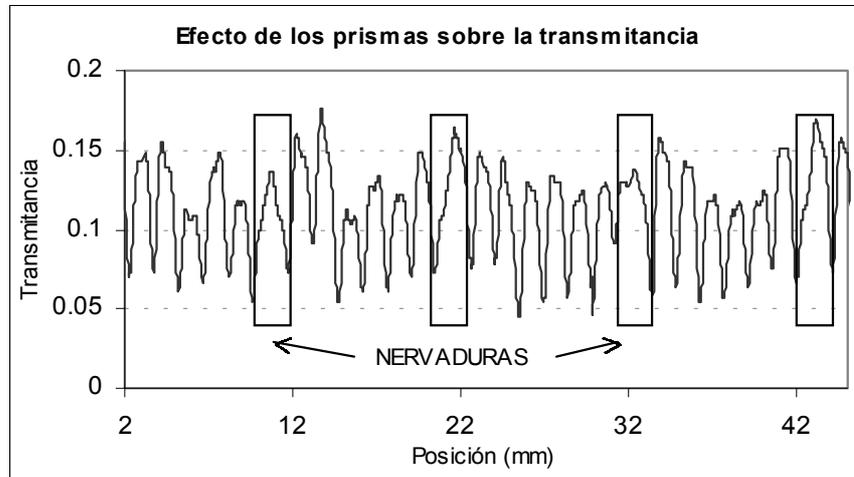


Fig.3: señal del fotodetector durante el barrido horizontal que muestra el efecto de los prismas y las nervaduras sobre la transmitancia.

#### ESTUDIO DE LA TRANSMITANCIA VISIBLE DE LA PLACA

A los efectos prácticos es necesario estudiar la transmitancia de la placa cuando está expuesta a un haz de rayos paralelos que inciden con una cierta inclinación. Para ello se iluminó la muestra con el haz láser expandido, colimado y filtrado mediante un sistema de lentes para obtener una iluminación uniforme. El resto del sistema es el utilizado en el apartado anterior. Debido al reducido tamaño de la muestra utilizada (8cm x 10cm), la primera determinación realizada fue la profundidad de penetración de los efectos de borde.

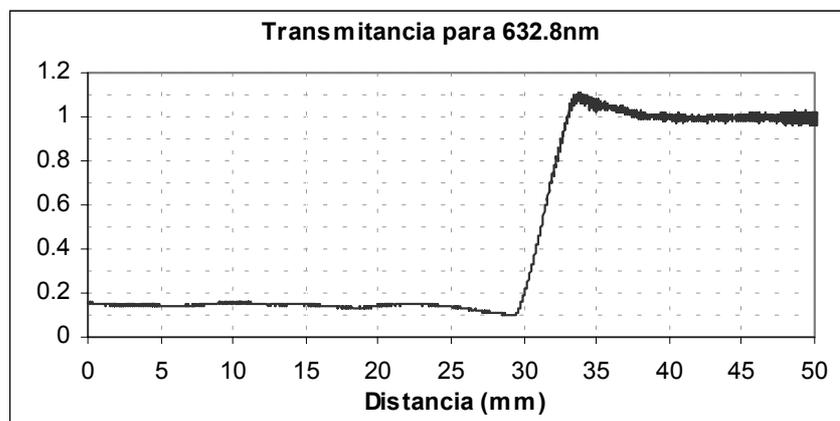


Fig. 4: transmitancia a distintas posiciones desde el centro de la muestra.

En la Fig. 4 se puede observar el cociente entre la intensidad transmitida y la intensidad incidente medidas desde el centro de la muestra. Mientras el haz láser incide sobre la muestra la transmitancia es del orden de 0.147. A 5mm del borde esta transmitancia comienza a disminuir hasta alcanzar su valor más bajo en 0.1, a partir del cual la transmitancia aumenta linealmente para luego alcanzar un valor constante de 1, en la zona de plena intensidad sin muestra. Los efectos de interferencia y difracción aparecen en la zona en que la transmitancia es mayor que 1. Se puede ver que los efectos de borde tienen influencia hasta 5mm hacia dentro de la muestra, por lo que mediciones realizadas en el centro de la misma no se ven afectadas por los bordes.

Luego de verificar que el tamaño reducido de la muestra no afecta las medidas realizadas en el centro de la misma, se procedió a estudiar la variación de la transmitancia con el ángulo de incidencia  $\theta$ . Se midió la radiación transmitida e incidente en el centro de la muestra para ángulos comprendidos entre  $0^\circ$  y  $80^\circ$ , con las nervaduras ubicadas

perpendicularmente a la trayectoria del haz (ver Fig. 1). El ángulo de incidencia se midió entre la dirección del haz laser y la normal al plano de la muestra. En la Fig. 5 se pueden analizar los resultados medidos de la transmitancia a la longitud de onda del laser para cada uno de los ángulos de incidencia: la transmitancia a ángulos de incidencia bajos es pequeña, aumentando rápidamente entre los 10° y los 25° para alcanzar un valor constante cercano a 0.2 a partir de los 30°. Este aumento de la transmitancia con el ángulo de incidencia es una de las características de estos innovadores materiales: en otros materiales translúcidos el comportamiento es exactamente opuesto, disminuyendo la transmitancia al aumentar el ángulo de incidencia. Efectivamente, en materiales transparentes macizos como el vidrio la transmitancia es constante hasta un cierto ángulo (del orden de 40°, de acuerdo al tipo de vidrio) y luego disminuye al aumentar el ángulo de incidencia (Duffie y Beckman, 1991); en los policarbonatos comunes sucede exactamente lo mismo (Perelló y Fasulo, 2001).

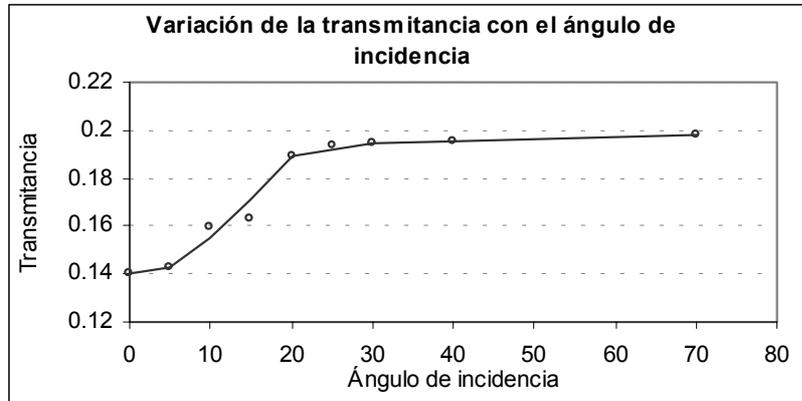


Fig. 5: variación de la transmitancia espectral (632.8nm) con el ángulo de incidencia, medido entre la dirección del haz y la normal a la muestra, con las nervaduras perpendiculares a la proyección del haz.

## EXPERIENCIAS CON LUZ SOLAR

La extensión de este análisis a otras longitudes de onda del espectro visible (380nm a 780nm) no es inmediata, debido a que debe conocerse cómo se comporta el material en cada longitud de onda. Para estudiar la transmitancia en el visible se utilizó un espectroradiómetro LICOR 1800, cuyo rango abarca desde los 300nm a los 1100nm, con el sol como fuente luminosa. Este espectroradiómetro consta de un monocromador, un detector de silicio, una interface para conversión de las medidas y 8 bancos de memoria para guardar datos. Mediante una conexión RS 232 se opera desde una PC. El rango de medida es de 300 a 1100nm, pero la fibra óptica opera sólo desde 389nm, por lo que para todas las determinaciones se utilizaron los datos desde los 400nm (Echazú et al., 2000). La resolución espectral es de 2nm. El monocromador está compuesto por una red de difracción holográfica y una rueda con siete filtros para eliminar armónicos. Debido a que las medidas de transmitancia visible se realizan con radiación directa, se eligieron días de atmósfera clara para realizar las mediciones (radiación difusa por debajo del 10% de la radiación total). Para eliminar la influencia de la radiación difusa se aplicaron correcciones a los resultados obtenidos, las cuales son despreciables a pequeños ángulos de incidencia y del orden del 5% como máximo para ángulos de incidencia grandes. Dicha corrección está dada por la ecuación

$$\tau_{global} = \frac{\tau_{medida} - \tau_{difusa} (G_{difusa} / G_{global})}{1 - (G_{difusa} / G_{global})} \quad (2)$$

en donde  $\tau_{global}$  es la transmitancia visible corregida que se desea calcular,  $\tau_{global}$  es la transmitancia visible medida con el espectrómetro,  $G_{difusa}/G_{global}$  es la fracción de difusa con respecto a la global en el momento de la medición y  $\tau_{difusa}$  es la transmitancia de la placa a la radiación difusa. Esta última se midió en días muy nublados en que toda la radiación solar es difusa.

Debido a que la muestra es muy difusora y a que el diámetro de 1cm del sensor del espectroradiómetro es mucho mayor que el diámetro del fotodetector utilizado en las mediciones con laser, para poder comparar los valores obtenidos en ambas experiencias fue necesario colocar una cobertura negra con un pequeño agujero de 5mm de diámetro. El uso de esta cobertura evita que la radiación que incide en otras partes de la muestra pueda ingresar al sensor debido a las múltiples reflexiones que ocurren entre las capas del material. Se midió la radiación transmitida por la muestra en esas condiciones y a continuación la radiación incidente a través del agujero, colocando la cobertura directamente sobre el sensor. Los resultados obtenidos para varios ángulos de incidencia pueden analizarse en la Fig. 6: la transmitancia espectral es constante hasta los 650nm y ligeramente creciente entre los 650 y 780nm. Esta tendencia creciente continua en el infrarrojo cercano hasta los 1100nm, límite superior de medida del equipo. Se puede observar que a ángulos de incidencia pequeños, la transmitancia varía entre 0.14 (para 500nm) y 0.18 (para 780nm). Para la longitud de onda de 632nm la transmitancia medida es de 0.145, lo cual coincide con las mediciones realizadas con el haz láser. Para obtener la transmitancia a incidencia normal en todo el rango visible se realizó una integración entre los 380nm y los 780nm utilizando incrementos iguales de radiación solar incidente (Duffie y Beckman, 1991), obteniéndose una transmitancia visible de 0.15.

Cuando se utiliza un policarbonato con estas características interesa no sólo la radiación directa que se transmite sin modificar su dirección a través de la placa (transmitancia visible), sino también el porcentaje de radiación que incide sobre la

misma y que es dispersado por la placa en otros ángulos diferentes al ángulo de incidencia. Este porcentaje recibe el nombre de “transmisión de luz LT” o “turbidez” (ver Tabla 1). Esta turbidez puede ser inherente al material (como cuando es originada por su estructura molecular o debido a impurezas en la superficie o en el interior del polímero), o puede ser consecuencia de factores externos, como en el caso de envejecimiento o abrasión superficial. Para medirla, se coloca una muestra en el recorrido de un haz estrecho de luz brillante y se mide la energía incidente del haz y la energía transmitida a través del material que se desvía en más de  $2.5^\circ$  desde la normal. La transmisión de luz o turbidez se define como el porcentaje de luz incidente dispersada en más de  $2.5^\circ$ . La transmitancia se define como el porcentaje de luz incidente que se transmite en un ángulo menor a  $2.5^\circ$ .

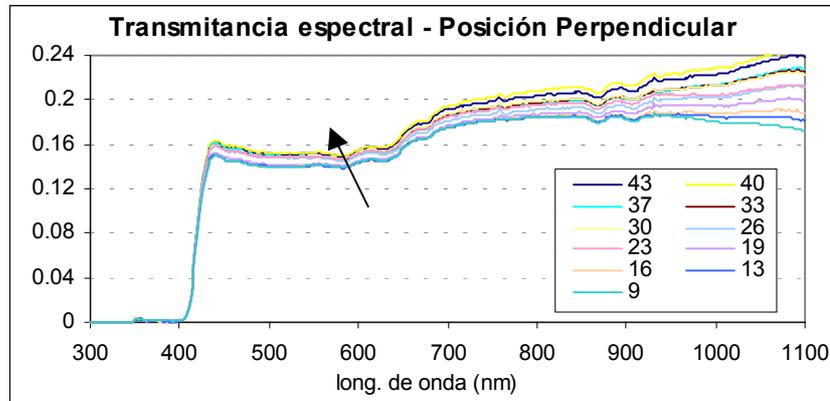


Fig. 6: Variación de la transmitancia espectral de una muestra de Selectogal 10NGB35, con las nervaduras en forma perpendicular a la proyección del haz incidente, para varios ángulos de incidencia.

#### Mediciones sin la cobertura

Cuando el sensor del espectroradiómetro LICOR 1800, de 1cm de diámetro, se utiliza sin colocar ninguna cobertura sobre la muestra, la cantidad de energía que recibe dicho sensor incluye la radiación que proviene del haz incidente que no se desvió de la normal y las contribuciones de todos los rayos que se desviaron de su trayectoria debido al proceso de dispersión, es decir, la transmitancia visible más la transmisión de luz, que llamaremos coeficiente global de transmisión visible. Al realizar un balance global de la energía transmitida por la placa, debe utilizarse dicho coeficiente, debido a que en él están consideradas la energía que se transmite directamente y la que se dispersa.

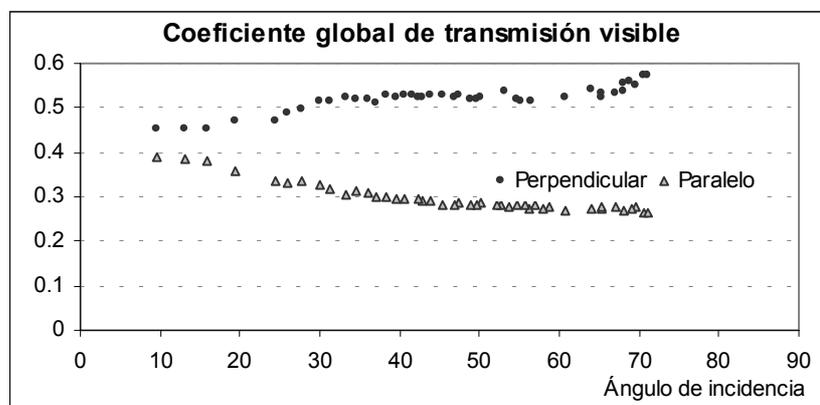


Fig. 7: transmitancia visible de una muestra de Selectogal 10NGB35 para distintos ángulos de incidencia y para las nervaduras de la muestra paralelas y perpendiculares a la proyección del haz incidente.

En la Fig. 7 se muestran los resultados obtenidos al medir mediante el espectroradiómetro la cantidad de energía incidente y la transmitida a través de la muestra para distintos ángulos de incidencia. El coeficiente global de transmisión a incidencia normal es del orden de 0.43. Los datos proporcionados por el fabricante son 0.143 para transmitancia visible y 35% para transmisión de luz, con lo que el resultado considerando ambos aportes es de 0.49. En dicha figura se puede observar también la variación del coeficiente global de transmisión cuando las nervaduras de la muestra son paralelas a la proyección del haz incidente. En este caso el comportamiento es diferente, disminuyendo al aumentar el ángulo de incidencia debido a que el funcionamiento de los prismas no es el indicado en la Fig. 1, sino que se asemeja más al de los vidrios y policarbonatos comunes. Es interesante observar que el coeficiente global de transmisión visible es en este caso aún más baja que cuando las nervaduras son perpendiculares al haz, mejorando el efecto de la cubierta en verano a costa de menor transmisión en invierno.

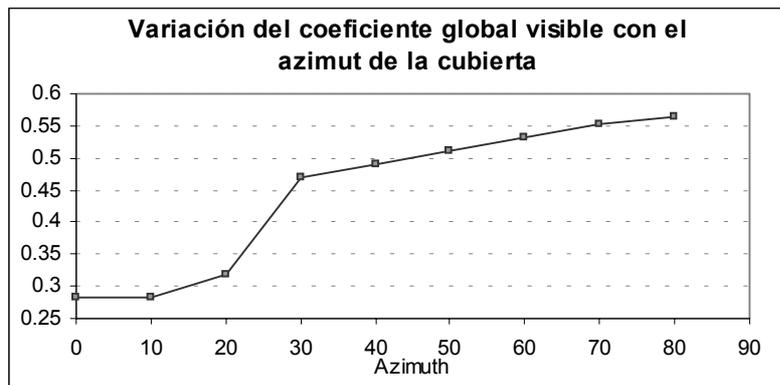


Fig.8: variación del coeficiente global de transmisión visible de una muestra de Selectogal 10NGB35 con el ángulo azimutal (ángulo de incidencia constante a 45°).

Finalmente, la última experiencia realizada consistió en variar el ángulo azimutal de la muestra manteniendo constante el ángulo de incidencia a 45°, de forma de analizar el comportamiento de la transmitancia visible con dicho ángulo, que se mide entre la dirección de la nervadura y la dirección de la proyección de la radiación solar. Los valores obtenidos para distintas posiciones azimutales de la muestra pueden analizarse en la Fig. 8: la transmitancia visible varía entre 0.28 y 0.56, lo cual es coherente con los valores medidos para dicho ángulo en la Fig. 7. La variación más pronunciada aparece entre los 20° y los 50°. Este comportamiento es opuesto al medido para policarbonatos alveolares comunes, en que a un mismo ángulo de incidencia la transmitancia disminuye al aumentar el ángulo azimutal (Barral et al., 2001).

## CONCLUSIONES

En este trabajo se estudió el comportamiento óptico de una placa de policarbonato con tratamiento geométrico para disminuir la carga térmica dentro de un edificio. La técnica laser utilizada resultó adecuada para analizar puntualmente el efecto de los prismas invertidos sobre la transmitancia y la variación de la misma a distintos ángulos de incidencia.

A incidencia normal la transmitancia visible medida fue 0.14, lo cual coincide con el valor proporcionado por la fábrica. Esta transmitancia es mucho menor que la de un vidrio o la de un policarbonato sin tratamiento (0.75). Al aumentar el ángulo de incidencia la transmitancia se incrementa, con lo que en periodos invernales en que el sol se encuentra bajo, se consigue buena transmisión de luz dentro del edificio, disminuyendo la misma cuando el sol incide con ángulos cercanos a la normal y evitando así el sobrecalentamiento en verano. En otros materiales translúcidos, la transmitancia disminuye con ángulos de incidencia grandes.

Las experiencias realizadas con el espectroradiómetro permitieron determinar la energía total visible transmitida por el material, del orden de 0.43 para incidencia normal, que incluye la radiación visible transmitida por la placa en la dirección del ángulo de incidencia y la radiación visible dispersada por la misma. En un próximo trabajo se prevee la medición mediante técnica láser de la cantidad de energía que se dispersa al atravesar el material, con lo cual se podrán comparar con los resultados obtenidos mediante el espectroradiómetro. En el futuro se prevee incorporar al programa *SIMEDIF para Windows* un módulo que permita incorporar este tipo de materiales a la simulación del comportamiento térmico de edificios.

## AGRADECIMIENTOS

Nuestro agradecimiento al Sr. Ricardo Echazú por su valiosa colaboración en las mediciones con el espectroradiómetro.

## BIBLIOGRAFÍA

- 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, ISSN 0329-5184.
- 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, ISSN 0329-5184.
- <http://www.licor.com>
- 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, ISSN 0329-5184.

## ABSTRACT

The measurements of translucent polycarbonate panels with geometrical designs that enable the controlled penetration of solar radiation and the transmission of daylight into buildings, while reducing heating and lighting costs are presented. These materials are used as covers in greenhouses, shopping centers, winter gardens and so on. Measurements of the sample spectral visible transmittance by a spectroradiometer LICOR 1800 were made. The visible transmittance throughout the sample prisms at the top layer was studied by using laser technology and a data acquisition system connected to a PC. Measurements of transmittance variations with incidence and azimuth angles and a comparison of these results with technical data were performed.