Diseño y producción de recubrimientos de control energético para su utilización en vidrio laminado

J. M. MARCO¹, L. ULIAQUE¹, F. VILLUENDAS²

¹Ariño Duglass S.A.

²Dpto. de Física Aplicada, Universidad de Zaragoza.

En este trabajo, se presenta un método de diseño y apoyo al proceso de producción que se ha desarrollado para la realización de vidrios con estructuras de multicapas depositadas. Este método se ha utilizado en el diseño y realización práctica de un recubrimiento de control solar en estructura de vidrio laminado, cuyas propiedades colorimétricas y de protección solar son similares a un vidrio bajo-emisivo en doble acristalamiento.

Palabras clave: Recubrimientos sobre vidrio, control solar, vidrio laminado.

Design and manufacture of solar control coatings for its application in laminated glass

In this work, a method of design and support of the productive process developed for the manufacture of multilayer coated glass is presented. This method has been used in the design and manufacture of a solar control coating in laminated glass, with colorimetric and solar properties similar to a low emissivity insulating glass.

Keywords: Glass coatings, solar control, laminated glass.

1.- INTRODUCCIÓN

Los acristalamientos usados en arquitectura con propiedades de control energético han aumentado su interés en los últimos años. Inicialmente, dichos acristalamientos se basaban en recubrimientos metálicos reflectantes que reducían en gran medida la transmisión de energía radiante procedente del sol, al mismo tiempo que proporcionaban cierta libertad para escoger el aspecto estético del edificio.

Actualmente las tendencias arquitectónicas se alejan del diseño de fachadas de vidrio con alta reflexión y buscan cada vez más la transparencia en los edificios, tratando de integrar los espacios interiores con el ambiente exterior, diseñando fachadas diáfanos con mayores superficies de vidrio [1-2].

El vidrio sodo-cálcico, sin tratamiento, presenta graves inconvenientes para su uso en dicha aplicación, debido a su elevada transmisión energética (el 83% de la energía radiante que incide sobre un vidrio incoloro de 6 mm de espesor penetra al interior del edificio), que provoca sobrecalentamientos y estancias poco confortables bajo radiación solar directa.

Por esta razón se han desarrollado recubrimientos basados en estructuras multicapas que proporcionan gran transparencia en el espectro visible y un aspecto estético próximo a un vidrio incoloro sin tratamiento, al mismo tiempo consiguen reducir la transmisión energética en el infrarrojo cercano. Estructuras similares a la que se muestra en la figura 1 se utilizan para este fin [3]. Estos tipos de recubrimientos se basan en los fenómenos interferenciales que se producen entre las múltiples reflexiones de las ondas electromagnéticas en cada intercara de la multicapa. En esta estructura las capas de

Figura 1: Estructura de un recubrimiento bajo-emisivo

óxido de estaño actúan como capas antirreflejantes en el centro del espectro visible, mientras que las capas de plata controlan la transmisión infrarroja del acristalamiento, existiendo un compromiso entre la transmisión energética y la transmisión luminosa.

Debido a la poca resistencia química de las capas de plata su utilización se ve restringida al interior de los dobles acristalamientos, donde existe un desecante molecular que asegura que el aire en contacto con el recubrimiento está exento de humedad.

Ahora bien, existen aplicaciones en las que no es posible el uso de dobles acristalamientos. Entre estas se encuentran, por ejemplo, las fachadas grapadas (ver fig. 2), en las que la sujeción de los vidrios se realiza mediante taladros practicados en los mismos, los ventanales usados en las oficinas bancarias, concesionarios de automóviles, etc. en los cuales no es posible el uso de dobles acristalamientos por varios motivos: múltiples reflexiones, que dificultan la visión del interior desde el exterior, grandes espesores de vidrio, etc. Pese a que no es posible el empleo de dobles acristalamientos, se sigue demandando algún tipo de protección solar, con ciertas restricciones impuestas sobre las propiedades ópticas.

Una forma posible de proteger la capa de plata es colocarla entre los dos vidrios que componen un vidrio laminado. Este tipo de vidrio consiste en la unión de dos láminas de vidrio por medio de una lámina plástica adherente de polivinil butiral (PVB). Se encontró que los recubrimientos bajo emisivos existentes habían sido diseñados para obtener un color neutro cuando los dos medios en contacto con la capa fueran vidrio y aire, sin embargo, en la aplicación que se deseaba implementar, los dos medios externos eran vidrio y polivinil butiral. El cambio en el índice de refracción provocaba una modificación en el espectro de reflexión, de manera que el color final del vidrio presentaba una tonalidad violácea. Este aspecto estético no es admitido en el acristalamiento de edificios, además hace inviable su uso junto a otros recubrimientos existentes en composiciones de doble acristalamiento (p.ej. DAG-66) por lo que es necesario desarrollar un nuevo recubrimiento que posea un color en reflexión neutro una vez finalizado el proceso de laminado. El producto comercial ARIPLAK DAG-66 consiste en un vidrio sodo-cálcico sobre el que se deposita un recubrimiento multicapa cuya estructura y composición se muestran en la figura 1. Este producto proporciona una alta transparencia en visible y una buena protección solar, además de mejorar el aislamiento térmico del acristalamiento gracias a la baja emisividad del recubrimiento, la característica de baja emisividad se pierde si el recubrimiento se sitúa en la cara interna del vidrio laminado por lo que el aislamiento térmico de la composición laminada será menor.

En este trabajo se aborda el desarrollo de un vidrio laminado con propiedades de control solar que presente un color neutro en reflexión, de manera que sea compatible con el producto existente en doble acristalamiento DAG-66. Para ello, en primer lugar, se presentan los fundamentos teóricos en los que se basan los cálculos de propiedades ópticas de vidrios compuestos que incorporen recubrimientos metálicos, láminas de PVB o cámara de aire. Posteriormente se describe el proceso de diseño de la estructura de multicapas de forma que el vidrio presente las propiedades estéticas y energéticas exigidas y, a continuación, el proceso de fabricación del vidrio, con la deposición de la estructura de multicapas mediante pulverización catódica, "sputtering", de los diferentes materiales y la realización del proceso de laminado.

Figura 2: Fachada grapada.

Finalmente, se realiza la comparación de los resultados obtenidos en el vidrio laminado con los previstos teóricamente y con los obtenidos en la configuración de doble acristalamiento, con el fin de verificar, por una parte, la validez del método de diseño desarrollado, y por otra, de comprobar la compatibilidad de utilización de ambas configuraciones.

2.- CÁLCULO DE FACTORES DE TRANSMISIÓN Y REFLEXIÓN EN ESTRUCTURAS DE VIDRIO Y DISEÑO DEL RECUBRIMIENTO

Los factores de transmisión y reflexión de una estructura compleja de vidrio vienen dados por el comportamiento de la luz en las diferentes intercaras, además de por las propiedades de absorción de los materiales usados. En consecuencia, para calcular los factores de la estructura

se necesita conocer las propiedades de transmisión y reflexión de las diferentes intercaras del vidrio y, en particular, de la intercara en la que se ha depositado la estructura multicapa.

Los coeficientes de transmisión y reflexión de una estructura multicapa pueden ser calculados por medio de cualquiera de los formalismos usados en la teoría de multicapas interferenciales [4]. Estos tratamientos establecen una relación entre el campo electromagnético a ambos lados de la estructura mediante una matriz 2×2 , a partir de la cual se pueden determinar los coeficientes de transmisión y reflexión. En este apartado se muestra un tratamiento de este tipo descrito en la referencia [5].

Se considera que cada capa está determinada por un espesor y un índice de refracción homogéneo, mientras que las fronteras que separan capas de distinto índice son planos de discontinuidad.

Las amplitudes de los campos electromagnéticos, en un sistema como el de la figura 3, vienen dadas por las soluciones de las ecuaciones de Maxwell. Dentro de cada región homogénea y dada la simetría plana de la estructura, las ecuaciones de Maxwell tienen como solución ondas planas transversales eléctricas (TE) y transversales magnéticas (TM), dependiendo de que la dirección del campo eléctrico sea paralelo o perpendicular al plano de incidencia.

Las amplitudes de los campos electromagnéticos, para modos con polarización p (TM), pueden ser expresadas de la siguiente forma:

$$\vec{E}_j = \begin{bmatrix} A_j(j) \\ 0 \\ -i \frac{V_j}{k_z} A_j(j) \end{bmatrix} \cdot \exp\{V_j(x-x_j)\} + \begin{bmatrix} A_j(j) \\ 0 \\ i \frac{V_j}{k_z} A_j(j) \end{bmatrix} \cdot \exp\{-V_j(x-x_j)\} \times \exp\{-i(k_z z - \omega t)\}$$

$$\vec{H}_j = \frac{\varepsilon_0 \omega n_j^2(\omega)}{K_z} \begin{bmatrix} 0 \\ A_j(j) \\ 0 \end{bmatrix} \cdot \exp\{V_j(x-x_j)\} + \begin{bmatrix} 0 \\ A_j(j) \\ 0 \end{bmatrix} \cdot \exp\{-V_j(x-x_j)\} \times \exp\{-i(k_z z - \omega t)\}$$

Mientras que para modos con polarización *s* (TE) obtenemos:

$$\vec{E}_j = -\frac{\mu_0 \omega}{K_z} \begin{bmatrix} 0 \\ A_I(j) \\ 0 \end{bmatrix} \cdot \exp\{V_j(x-x_j)\} + \begin{bmatrix} 0 \\ A_{II}(j) \\ 0 \end{bmatrix} \cdot \exp\{-V_j(x-x_j)\} \times \exp\{-i(k_z z - \omega t)\}$$

$$\vec{H}_j = \begin{bmatrix} A_I(j) \\ 0 \\ i \frac{V_j}{k_z} A_I(j) \end{bmatrix} \cdot \exp\{V_j(x-x_j)\} + \begin{bmatrix} A_{II}(j) \\ 0 \\ -i \frac{V_j}{k_z} A_{II}(j) \end{bmatrix} \cdot \exp\{-V_j(x-x_j)\} \times \exp\{-i(k_z z - \omega t)\}$$

siendo: $V_j = \left(k_z^2 - n_j^2(\omega) \frac{\omega^2}{c^2}\right)^{1/2}$; $k_z = k \cdot n_z$; $n_z = n_0 \cdot \cos\theta_0$, siendo θ_0

el ángulo de incidencia; n_j el índice de refracción complejo de la capa j y c la velocidad de la luz en el vacío. Como los índices de refracción son, en general, complejos se adopta el siguiente convenio de signos: $\text{Re}(V_j) > 0$ y $\text{Im}(V_j) < 0$ si $\text{Re}(V_j) = 0$. De esta forma, como los índices de refracción a ambos lados de la estructura son reales, el término $A_I(0)$ representa la amplitud de la onda incidente, $A_{II}(0)$ la amplitud de la onda reflejada, y $A_I(n)$ la amplitud de la onda transmitida.

La relación entre las amplitudes $A_I(j)$, $A_{II}(j)$ en diferentes capas viene determinada por la continuidad de las componentes tangenciales de los campos. Esta relación se puede propagar a través de todas las capas de la estructura de forma que las amplitudes de los campos a ambos lados de la misma quedan ligadas por la siguiente relación matricial:

$$\begin{pmatrix} A_I(0) \\ A_{II}(0) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_I(n) \\ A_{II}(n) \end{pmatrix} = T(0,1)P(1)T(1,2)\dots P(n-1)T(n-1,n) \begin{pmatrix} A_I(n) \\ A_{II}(n) \end{pmatrix}$$

siendo:

$$T(j-1,j) = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} \frac{n_j^2}{n_{j-1}^2} + \frac{V_j}{V_{j-1}} & \frac{n_j^2}{n_{j-1}^2} - \frac{V_j}{V_{j-1}} \\ \frac{n_j^2}{n_{j-1}^2} - \frac{V_j}{V_{j-1}} & \frac{n_j^2}{n_{j-1}^2} + \frac{V_j}{V_{j-1}} \end{pmatrix} \quad \text{para modos TM,}$$

y

$$T(j-1,j) = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 + \frac{V_j}{V_{j-1}} & 1 - \frac{V_j}{V_{j-1}} \\ 1 - \frac{V_j}{V_{j-1}} & 1 + \frac{V_j}{V_{j-1}} \end{pmatrix} \quad \text{para modos TE,}$$

las matrices que describen la transmisión en la intercara entre capas sucesivas ($j-1,j$),

y $P(j) = \begin{pmatrix} \exp(-V_j d_j) & 0 \\ 0 & \exp(V_j d_j) \end{pmatrix}$ la matriz que representa la propa-

gación del campo a través de la capa j de espesor d_j , siendo esta matriz la misma tanto para modos TE como para modos TM.

Los factores de transmisión y reflexión de una multicapa vienen dados por el cociente entre la energía transmitida o reflejada y la energía incidente por unidad de área.

$$T = \frac{n_n \cos\theta_n}{n_0 \cos\theta_0} \left| \frac{A_I(n)}{A_I(0)} \right|^2, \quad R = \left| \frac{A_{II}(0)}{A_I(0)} \right|^2$$

Este cociente puede ser expresado en función de los elementos de la matriz característica del sistema:

Figura 3: Campos electromagnéticos en una estructura multicapa

Figura 4: Coeficientes de reflexión y transmisión en un vidrio monolítico

$$\text{Para modos TM: } T_{TM} = \frac{V_n \cdot n_n^2}{V_0 \cdot n_0^2} \frac{1}{|M_{22}|^2}, \quad R_{TM} = \left| \frac{M_{12}}{M_{22}} \right|^2$$

$$\text{Para modos TE: } T_{TE} = \frac{V_n}{V_0} \frac{1}{|M_{22}|^2}, \quad R_{TE} = \left| \frac{M_{12}}{M_{22}} \right|^2$$

Los factores anteriores se refieren a los factores de transmisión y reflexión de una estructura multicapa, para obtener el factor de transmisión y reflexión de un vidrio se debe tener en cuenta la transmisión y las múltiples reflexiones producidas en la otra cara, que además están influenciadas por la absorción en la masa del vidrio. Al ser los espesores de vidrio utilizado del orden de unos pocos milímetros, la luz natural no puede ser considerada coherente y bastará con sumar las intensidades de las ondas reflejadas y transmitidas en cada cara.

Usando la notación que aparece en la figura 4 para cada coeficiente se pueden encontrar los factores de transmisión y reflexión del vidrio compuesto [6]:

$$T = \frac{\tau_c \cdot \tau_v \cdot e^{-\alpha_v d_v}}{1 - \rho'_c \cdot \rho_v \cdot e^{-2\alpha_v d_v}}$$

$$R_{capa} = \rho_c + \frac{\rho_v \cdot \tau_c^2 \cdot e^{-2\alpha_v d_v}}{1 - \rho'_c \cdot \rho_v \cdot e^{-2\alpha_v d_v}}$$

$$R_{vidrio} = \rho_v + \frac{\rho'_c \cdot \tau_v^2 \cdot e^{-2\alpha_v d_v}}{1 - \rho'_c \cdot \rho_v \cdot e^{-2\alpha_v d_v}}$$

Figura 5: Coeficientes de reflexión y transmisión en un vidrio laminado

En el caso de vidrios laminados, el recubrimiento se encuentra situado entre una lámina de PVB, y un vidrio, tal como se muestra en la figura 5. Se ha comprobado que la influencia del PVB en las propiedades ópticas es despreciable en el espectro visible, por ser su índice de refracción ($n_{\text{PVB}}=1.48$) próximo al del vidrio ($n_{\text{vidrio}}=1.52$) y su absorción pequeña en ese intervalo, apreciándose su efecto en el infrarrojo cercano.

$$T = \frac{\tau_v^2 \cdot \tau_c \cdot e^{-(\alpha_1 d_1 + \alpha_2 d_2)}}{(1 - \rho_v \cdot \rho_c \cdot e^{-2\alpha_1 d_1}) \cdot (1 - \rho'_c \cdot \rho_v \cdot e^{-2\alpha_2 d_2}) - \tau_c^2 \cdot \rho_v^2 \cdot e^{-2(\alpha_1 d_1 + \alpha_2 d_2)}}$$

$$R = \rho_v + \frac{\tau_v^2 \cdot \rho_c \cdot e^{-2\alpha_1 d_1} \cdot (1 - \rho'_c \cdot \rho_v \cdot e^{-2\alpha_2 d_2}) + \tau_v^2 \cdot \tau_c \cdot \rho_v \cdot e^{-2(\alpha_1 d_1 + \alpha_2 d_2)}}{(1 - \rho_v \cdot \rho_c \cdot e^{-2\alpha_1 d_1}) \cdot (1 - \rho'_c \cdot \rho_v \cdot e^{-2\alpha_2 d_2}) - \tau_c^2 \cdot \rho_v^2 \cdot e^{-2(\alpha_1 d_1 + \alpha_2 d_2)}}$$

En ambos casos τ_v y τ_c representan los factores de transmisión en la intercara aire-vidrio y en la estructura de multicapas. ρ_v y ρ_c los respectivos coeficientes de reflexión, ρ'_c es el coeficiente de reflexión de la multicapa en sentido contrario al de la luz incidente y por α_v se representan los coeficientes de absorción de los diferentes vidrios cuyo espesor está determinado por d_v .

Se ha desarrollado un programa informático que aplica esta teoría al cálculo de las propiedades de transmisión y reflexión espectral de un vidrio recubierto con un sistema de multicapas, en función del espesor de cada capa y de los índices de refracción de los materiales usados en el recubrimiento. El programa tiene en cuenta la influencia del vidrio base, e incluye la posibilidad de calcular las propiedades ópticas si el vidrio recubierto se ensambla en un vidrio laminado.

Los valores globales de transmisión visible y solar se han

Figura 6: Curvas de reflectancia del recubrimiento DAG-66 doble y laminado

calculado utilizando la norma internacional ISO 9050, usando el iluminante estándar D65 y la distribución solar dada por P.Moon para una masa de aire de 2.0. Las coordenadas colorimétricas se han calculado según el sistema CIE L* a* b* 1976.

El propósito de este trabajo ha sido desarrollar un vidrio laminado que incorpore un recubrimiento multicapa, y que proporcione un color neutro en reflexión, compatible con el producto DAG-66 utilizado en dobles acristalamientos. En la figura 6 se muestran los espectros de reflectancia de ambas configuraciones; las pequeñas desviaciones que aparecen determinan las diferencias cromáticas que hacen incompatible su utilización conjunta, Tabla I.

La caracterización óptica se ha realizado mediante un espectrofotómetro UV-VIS-NIR, que utiliza una lámpara halógena de tungsteno y un mococromador como fuente de luz en el rango 380-2500 nm, un fotodiodo PIN de Si y una fotorresistencia de PbS conectados a un amplificador "lock-in" como cadena de detección.

Con el propósito de compatibilizar ambas configuraciones se ha utilizado el método de cálculo desarrollado. Partiendo de la misma estructura multicapa usada en el producto DAG-66, se obtuvieron los espesores de las diferentes capas involucradas que determinan un coeficiente de reflexión con características cromáticas compatibles con la del producto DAG-66 en doble acristalamiento. Los espesores obtenidos, junto con los factores globales teóricos de transmisión y reflexión se presentan en la Tabla II, y las curvas teóricas de reflectancia se muestran en la figura 7, donde puede apreciarse la coincidencia con la curva experimental de reflectancia de la configuración en doble acristalamiento.

TABLA I: COORDENADAS COLORIMÉTRICAS DEL RECUBRIMIENTO DAG66

	Laminado	Doble Acristalamiento	Δ
Rvisible	8.3%	9.0%	-0.7%
L*	34.8	36.0	-1.2
a*	4.4	-1.7	+6.1
b*	-8.7	1.3	-10.0

TABLA II: ESPESORES Y VALORES GLOBALES DEL RECUBRIMIENTO PROPUESTO

Capa	Espesor	Valores obtenidos por simulación
Vidrio laminado 6+6 mm		
SnOx	37nm	Tvisible 68.2 %
Ag	13nm	Rvisible 8.3 %
SnOx	80nm	L* 35.5
Ag	9nm	a* 0.9
SnOx	41nm	b* -1.0
		Tsolar 38.5%
		Rsolar 23.1%

Con el fin de determinar si el recubrimiento diseñado era válido para su uso en arquitectura, se realizó una prueba de estabilidad del recubrimiento, consistente en calcular la variación de color de la reflexión por el lado del vidrio provocado por una variación teórica en el espesor de las capas de un $\pm 2\%$. Esto es necesario porque en la práctica no es posible la deposición sobre vidrios de dimensiones $3,6 \times 2,4 \text{ m}$ con variaciones del espesor menores de un $\pm 2\%$, por lo que se debe asegurar que dicha variación no afecta significativamente al aspecto estético del acristalamiento. Como se observa en la Tabla III, las variaciones en color calculadas son inferiores a 3 puntos en cualquiera de las coordenadas colorimétricas, por lo que se puede considerar viable su fabricación industrial.

3.- REALIZACIÓN PRÁCTICA

La deposición del recubrimiento se realizó mediante pulverización catódica en una máquina AIRCO G-41, equipada con cátodos planos del tipo HRC6000, dedicada a la producción industrial de vidrios para arquitectura. La presión de la cámara de vacío, una vez introducido el gas de proceso, fue de $2 \times 10^{-3} \text{ torr}$. La deposición de las capas de plata se realizó en atmósfera pura de argón, mientras que para el SnO_x se utilizó una atmósfera compuesta por un 95 % de oxígeno y un 5 % de argón. La deposición se realizó a temperatura ambiente sobre un vidrio sodo-cálcico incoloro de 6 mm de espesor.

Debido a la imposibilidad de medir los espesores depositados, como consecuencia de la fabricación en continuo del recubrimiento, es necesario realizar ajustes en las potencias de los cátodos durante el proceso de deposición, de manera que se asegure que los espesores de las capas depositadas sean similares a los diseñados. Como el proceso de laminado es posterior al de deposición, los ajustes se deben realizar comparando las curvas de reflectancia y transmitancia del vidrio fabricado con los valores proporcionados por la simulación del recubrimiento sobre un vidrio monolítico, no laminado.

Una vez fabricado el recubrimiento se realizó el proceso de ensamblado del vidrio recubierto con otro vidrio incoloro de 6mm, mediante una lámina de 0.38 mm de espesor de PVB. El proceso de ensamblaje consistió en un calandrado previo a una temperatura de 240°C durante 5 minutos y en un ciclo de autoclave de 3 horas de duración a una temperatura de 110°C y una presión de 11 atmósferas, con el fin de extraer el aire contenido en la lámina de PVB y favorecer la adherencia entre la lámina y el vidrio.

Figura 7: Curvas de reflectancia del recubrimiento desarrollado y DAG-66

TABLA III: ESTABILIDAD DE LA ESTRUCTURA

Capa	Variación en espesor	Transmisión visible (%)	Reflexión visible (%)	L	a	b
Valor de Referencia		68,2	8,3	35,5	0,9	-1,0
SnO_2	-2%	67,9	8,3	35,4	0,9	0,1
	-1%	68,1	8,3	35,5	0,9	-0,4
	+1%	68,3	8,4	35,6	0,8	-1,6
	+2%	68,5	8,4	35,7	1,1	-2,3
Ag	-2%	68,6	8,3	35,4	0,7	-0,5
	-1%	68,4	8,3	35,5	0,8	-0,6
	+1%	68,1	8,3	35,5	1,0	-1,3
	+2%	67,8	8,4	35,7	1,2	-1,5

4.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Una vez ensamblado el vidrio laminado, se realizó la caracterización espectrofotométrica del mismo. Los resultados obtenidos para el comportamiento en el visible se muestran en la figura 7, y para el comportamiento energético en la figura 8. En ambas figuras se muestran los resultados obtenidos junto con los simulados teóricamente y con los correspondientes al producto DAG-66 en doble acristalamiento. El grado de acuerdo obtenido se puede evaluar a partir de la comparación de las coordenadas de color y factores globales de transmisión y reflexión de ambas estructuras que se muestran en la Tabla IV.

Figura 8: a) Curvas de transmitancia y b) Curvas de reflectancia del recubrimiento desarrollado

TABLA IV: COMPARACIÓN DE VALORES OBTENIDOS

	Transmisión visible (%)	Reflexión visible (%)	Color en Reflexión			Transmisión solar	Reflexión solar
			L*	a*	b*		
Simulado	68,2	8,3	35,5	0,9	-1,0	38,5	23,1
Experimental	69,2	8,7	34,1	0,0	-3,2	36,9	25,4
DAG66 D.A.	66,3	9,3	36,0	-1,7	1,3	35,9	24,5

La diferencia entre los valores obtenidos para el vidrio laminado desarrollado y el doble acristalamiento indica que la diferencia de color existente no va a provocar grandes contrastes si se usan ambos acristalamientos en un mismo edificio, dado que son prácticamente indistinguibles, aún en comparación directa, y que el comportamiento energético de las dos configuraciones es similar, ya que los espectros de transmisión y reflexión en el intervalo 380-2500 nm son prácticamente coincidentes. Asimismo, la concordancia entre los valores obtenidos y los simulados teóricamente indica que el método de cálculo puede ser utilizado para predecir las propiedades ópticas de nuevos recubrimientos.

Para determinar la compatibilidad entre el recubrimiento y el PVB se realizaron ensayos de ebullición, impacto y ultravioleta-humedad. Además, se realizaron observaciones del recubrimiento con un microscopio óptico Olympus BX-60 y una medida espectrofotométrica para detectar posibles variaciones en las propiedades de la capa.

El ensayo de ebullición es una prueba estándar usada para comprobar la calidad de los vidrios laminados utilizados en el sector de automoción, tal y como se describe en la Directiva Europea 92/22/CEE (Reglamento ER43). Consiste en sumergir una probeta de 300_300 mm en agua hirviendo durante un periodo de 2 horas y observar la formación de burbujas cerca de los cantos del vidrio. El vidrio laminado con recubrimiento bajo-emisivo fue sometido a 3 ciclos de 2 horas. En un examen mediante microscopio óptico no se observaron principios de corrosión, y las propiedades fotoenergéticas permanecieron estables.

El ensayo de impacto se utiliza para comprobar la adherencia entre el PVB y las superficies del vidrio. En este caso se trataba de comprobar la adherencia entre el PVB y el recubrimiento. El ensayo, descrito en la misma directiva europea, consiste en golpear una probeta de 300_300 mm con una bola de acero de 0.5 Kg, lanzada desde una altura de 3.18m. El impacto debe romper el vidrio pero éste debe quedar adherido. En los ensayos realizados se comprobó que el comportamiento del vidrio era similar al de un vidrio laminado sin recubrimiento, siendo la adherencia entre el PVB y la capa suficiente.

Finalmente, una probeta fue sometida a un ensayo de ultravioleta-humedad, consistente en someter la muestra a una temperatura de 55°C, una humedad relativa del 95 %, y una

radiación ultravioleta de intensidad 25 W/m² durante 500 horas, a la finalización del ensayo se comprobó que no existía corrosión ni alteración del recubrimiento.

El acuerdo alcanzado entre los resultados teóricos y los obtenidos experimentalmente permite que este método constituya un procedimiento eficaz para el desarrollo de nuevas estructuras con propiedades ópticas específicas. Además representa un mecanismo de realimentación, tanto en la realización práctica de dichos recubrimientos, como en la corrección de las desviaciones que, dados los mecanismos de desgaste de las instalaciones, se producen en el propio proceso de producción industrial.

5.- CONCLUSIONES

En este trabajo, se presenta un método de diseño y apoyo al proceso de producción desarrollado para la producción de vidrios cuyas propiedades estéticas y de control energético vienen determinadas por las estructuras de multicapas depositadas. Se ha elaborado un método de cálculo para la obtención de las propiedades ópticas de los vidrios con capas depositadas.

El método desarrollado se ha utilizado en el diseño y realización práctica de un recubrimiento de control solar en estructura de vidrio laminado, cuyas propiedades colorimétricas y de control energético son similares al producto DAG-66 en doble acristalamiento, con el fin de que dicha configuración de vidrio laminado sea utilizable en arquitectura, siendo, además, su utilización compatible con el producto anterior.

El sistema de multicapas desarrollado es estable frente a variaciones en los espesores y adecuado para su producción industrial. Las diferencias de color entre la reflexión del vidrio laminado desarrollado y el doble acristalamiento son suficientemente pequeñas, de manera que se pueden usar ambos tipos de vidrio en un mismo edificio sin que existan diferencias colorimétricas y de propiedades ópticas apreciables.

BIBLIOGRAFÍA

1. J. Chávarri, "Luz y transparencia en la arquitectura", *Proc. I Congreso Nacional de Ventanas y Fachadas Ligeras*, 1997.
2. J. Carpenter, "The structure of transparency. A view of current and future uses of glass in architecture", *Proc. Glass Processing Days*, 1997.
3. S.J. Nadel, R.J. Hill, "Double low-e coated glass for use in warm temperate climates", *Proc. Glass Processing Days*, 1997.
4. A. Thelen, "Design of optical interference coatings", McGraw-Hill, 1988.
5. J.M Subías, "Estudio teórico y desarrollo experimental de dispositivos multiplexores en longitud de onda basados en fibras ópticas pulidas lateralmente", *Tesis Doctoral, Departamento de Física Aplicada, Universidad de Zaragoza*, Septiembre 1996.
6. ISO 9050, "Glass in building.- Determination of light transmittance, solar direct transmittance, total solar energy transmittance and ultraviolet transmittance, and related glazing factors", 1990.

Recibido: 19.10.99

Aceptado: 28.08.00