



01193  
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO

---

---

PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN  
INGENIERÍA (ENERGÍA)

**DESARROLLO DE ARREGLOS DE VIDRIOS LAMINADOS  
CON RECUBRIMIENTOS ESPECTRALMENTE SELECTIVOS  
PARA APLICACIONES ARQUITECTÓNICAS Y  
AUTOMOTRICES**

T E S I S  
QUE PARA OBTENER EL GRADO DE  
DOCTOR EN INGENIERÍA (ENERGÍA)

PRESENTA:

**JORGE OVIDIO AGUILAR AGUILAR**

DIRECTOR DE TESIS: DR. KARUNAKARAN NAIR PADMANABHAN P.

2005

m. 340831



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## DEDICATORIAS

A mi hijo **Jorge Abraham:**

Mi mayor inspiración y motivación,  
gracias DIOS mío por darme la bendición de tener un hijo como él.

A mi esposa **Cecilia López:**

Por toda la paciencia, el apoyo y el amor incondicional que me has dado, te amo.

A mis padres, **Victoria y Saturnino:**

Por el gran amor, confianza y apoyo que me han brindado toda la vida, que DIOS los bendiga.

A mis hermanas, **Martha y Olga:**

Por los hermosos momentos que vivimos en nuestra infancia y por todo el apoyo que me han brindado durante mi carrera profesional.

A la memoria de mi Tío **Jesús Arenas:**

Por todo el apoyo que me brindaste para hacer de mi un buen profesionista

A la memoria de **Adrián Martínez Millán:**

Por ese ejemplo de dedicación y trabajo que nos dejaste a tus compañeros del CIE.

Autorizo a la Dirección General de Bibliotecas de la UNAM a difundir en formato electrónico e impreso el contenido de mi trabajo profesional.

NOMBRE: JORGE ORLANDO ACILAR ACILAR

FECHA: 04/FEB/16

FIRMA: [Firma manuscrita]

## AGRADECIMIENTOS

Expreso mi más sincero agradecimiento al **Dr. Karunakaran Nair**, por darme la confianza y el apoyo para desarrollar este trabajo de investigación bajo su dirección, gracias por todas sus enseñanzas y buenos consejos. A la **Dra. Santhamma Nair** por el gran apoyo, enseñanzas y consejos que me ha brindado durante este proyecto.

Un especial agradecimiento a los miembros del jurado de tesis, por sus valiosos y atinados comentarios a este trabajo: **Dra. Gabriela Álvarez García, Dra. M. T. S Nair, Dr. Rafael Almanza Salgado, Dr. Claudio A. Estrada Gasca, Dr. Arturo Fernández Madrigal y Dr. Guillermo Pulos Cárdenas.**

Al **Dr. Aarón Sánchez Juárez, Dr. Jorge Rojas Menéndez, M.F.M. José Campos Álvarez** y al **Téc. Oscar Gómez Daza Almendaro**, por el apoyo, enseñanzas y sobre todo la amistad que recibí de ustedes durante mi estancia en el CIE. Al **Dr. Wilfrido Rivera Gómez Franco** y al **Dr. Edgar Santoyo Gutiérrez** por las facilidades otorgadas para la realización de mi examen de grado. A todos mis compañeros con quienes tuve la oportunidad de trabajar y convivir: **Yamilet, Airel, Fernando, Nicolás, Yolanda, Verónica, David, Manuela, José Ortega, Luis, Felipe, Rogelio, Sarah, María Luisa, Bindu, Donají, Lupita, Eva, Beatriz, César, Harumi, Jorge, Carlos, Víctor, Adrián, Silvia, y Lourdes.**

Al Centro de Investigación en Energía, CIE-UNAM y al Posgrado en Ingeniería de la UNAM, por brindarme las facilidades para desarrollar este proyecto de investigación. A todo el personal Académico y Administrativo de CIE por las facilidades y el apoyo otorgado durante mi estancia en el CIE. A todos los trabajadores que me brindaron su amistad y apoyo en este tiempo, gracias.

A mis amigos del *Cenidet*: **Dr. José María Rodríguez Dr. Jorge Colín, Dr. Jesús Xamán, M. C. Efraín Simá y M. C. Heladio Martínez**, por la gran amistad que nos ha unidos todos estos años y la alegría que siento al saber que todos estamos logrando nuestros objetivos.

A la **Gerencia de Materiales y Procesos Químicos del Instituto de Investigaciones Eléctricas**, por otorgarme las facilidades para llevar a cabo las pruebas de adhesión a los vidrios laminados desarrollados en este trabajo. Un especial agradecimiento al **Ing. Alberto Brito Luisillo** y al **Sr. Serafín Castro** por el soporte técnico y por la amistad que me brindaron durante el desarrollo de las pruebas de adhesión. A la empresa **Sekisui S-Lec de México**, por las facilidades otorgadas para la elaboración de los vidrios laminados. Un especial agradecimiento a: **Ing. Pedro Córdoba**, **Ing. Miguel Hernández** y al **Sr. Eduardo Chavaje**, por el soporte técnico y la amistad que me brindaron durante mi proyecto de investigación. A la empresa **Vancouver Glass**, Jiutepec, Mor., por las facilidades otorgadas en el proceso de laminación de vidrios.

Al **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, CONACYT** y al **Sistema Nacional de Investigadores SNI**, por el apoyo económico que me otorgo para el desarrollo de este trabajo de investigación. A los proyectos **DGAPA-UNAM (IN106300)**, **MOR-CONACyT - (MOR-2003-01-9350)** y por el apoyo económico que recibió mi proyecto de investigación.

A la **Universidad de Texas en Austin**, por las facilidades otorgadas para la realización de las pruebas de impacto y adhesión a los vidrios laminados. Al **Dr. Ken Liechti** y **Dr. Ravi Chandar**, por sus pacientes consejos para la realización de las pruebas experimentales de adhesión e impacto respectivamente.

Al Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas, CIICAP, por las facilidades otorgadas para el análisis de AFM. En especial a la **Dra. María Elena Nicho** y la **Srita. Maricruz Resendíz** por las facilidades otorgadas para los análisis de AFM.

A todas aquellas personas (muchas) que directa o indirectamente me brindaron su apoyo incondicional para la realización de este trabajo, **mis más sincero agradecimiento!**

## *No claudiques*

*Cuando vayan mal las cosas como a veces suelen ir*

*Cuando ofrezca tu camino solo cuestas que subir*

*Cuando tengas poco haber pero mucho que pagar*

*Y precisas sonreír aún teniendo que llorar*

*Cuando vayan mal las cosas como a veces suelen ir*

*Cuando ofrezca tu camino solo cuestas que subir*

*Cuando ya el dolor te agobie y no puedas ya sufrir*

*Descansar acaso debes, pero nunca desistir*

*Fras las sombras de la duda, ya plateadas, ya sombrías*

*Puede bien surgir el triunfo, no el fracaso que temías*

*Y no es dable a tu ignorancia figurarse cuán cercano*

*Puede estar el bien que anhelas y que juzgas tan lejano*

*Lucha, lucha por más que tengas en la brega que sufrir*

*Cuando todo este peor, ¡más debemos insistir!*

*R. Kipling*

## RESUMEN

En este trabajo se presenta el desarrollo de vidrios laminados con películas espectralmente selectivas para el control de la radiación solar, que permiten reducir la carga térmica al interior de edificaciones y automóviles en climas cálidos. Estos envidriados además, tienen características mecánicas similares a un vidrio laminado de seguridad. Esto permite su uso en regiones geográficas propensas a tormentas tropicales y huracanes. Las películas espectralmente selectivas utilizadas en este trabajo fueron películas delgadas semiconductoras de sulfuro de cobre y seleniuro de cobre, y una combinación de éstas, depositadas sobre sustratos de vidrio y polietileno de tereftalato (PET) por el método de depósito por baño químico (CBD, en inglés). Con los sustratos depositados se prepararon varios tipos de *arreglos de vidrios laminados controladores de la radiación solar (avilcrasol)*. Los valores de transmitancia óptica del 20-40% permiten suficiente iluminación al interior, y la reflectancia especular del 10% minimiza el deslumbramiento en la región del visible, típico de este tipo de envidriados. La transmitancia óptica en la región del cercano infrarrojo es menor al 10%, lo cual conduce a una reducción en la carga térmica al interior bajo condiciones de irradiación solar. La evaluación óptica del comportamiento de este tipo de envidriados, *avilcrasol*, se realizó siguiendo la norma ISO 9050:2003, donde se considero una irradiancia espectral solar de AM1.5 ( $850 \text{ W/m}^2$ ) con la sensibilidad del ojo humano a la visión diurna. Se utilizaron programas de cómputo reportados en trabajos previos, para evaluar el comportamiento térmico de los *avilcrasol* bajo diferentes condiciones. Se encontró que instalar un *avilcrasol* con valores de transmitancia, reflectancia y absorptancia solar total de 0.08-0.22, 0.09-0.11 y 0.66-0.83, respectivamente, en ventanas de edificaciones o automóviles, podría reducir la carga térmica al interior en un 40%-50%, en comparación con un vidrio laminado claro. Esto permitiría un ahorro significativo en acondicionamiento del aire. Se evaluaron por primera vez las propiedades mecánicas de los *avilcrasol* utilizando el método de prueba de corte-compresivo. Los resultados mostraron que en el caso de los *avilcrasol* con películas delgadas depositadas sobre vidrio, en general, no hay cambios significativos en la resistencia adhesiva, comparado con los vidrios laminados claros. La adhesión de los *avilcrasol* esta en función del tipo y espesor de las películas delgadas depositadas. Los mejores resultados fueron de los *avilcrasol* con películas delgadas de sulfuro de cobre y seleniuro de cobre depositadas sobre vidrio recubierto con una película delgada de sulfuro de zinc como sustrato. Los valores de resistencia adhesiva de estos envidriados estuvieron en el rango de 9-12 MPa, lo cual es apropiado para su aplicación en ventanas de edificaciones y automóviles. Para los *avilcrasol* que incorporan recubrimientos semiconductores sobre hojas de PET, las características ópticas y térmicas fueron comparables a los que incorporan recubrimientos sobre vidrio, pero el comportamiento mecánico fue inferior. Con base en la experiencia práctica ganada durante el desarrollo de este proyecto, se establecieron criterios para la selección de vidrios laminados de control solar para diversas aplicaciones en zonas tropicales. Se presentan recomendaciones sobre el uso de catorce diferentes tipos de *avilcrasol* desarrollados en este proyecto, para aplicaciones arquitectónicas y automotrices. Las perspectivas tecnológicas de este trabajo son prometedoras. Se espera que la trascendencia de este proyecto, incluyendo la realización del trabajo futuro propuesto al final del mismo, tengan el potencial de impactar de manera positiva en la reducción del consumo de energía a nivel nacional.

## ABSTRACT

The development of laminated glass with spectrally selective solar control thin films, which reduce thermal load in buildings and automobiles in warm climates, is presented. These glazings also possess mechanical characteristics similar to those of commercial laminated safety glass. This implies their use in geographical regions prone to tropical storms and hurricanes. Spectrally selective thin films used in this work are semiconducting thin films of copper sulphide and copper selenide, and a combination of these deposited on glass and polyethylene terephthalate sheets (PET) by the chemical bath deposition (CBD) method. Using the coated substrates, various arrangements of laminated solar control glazings (avilcrasol in Spanish) were prepared. Optical transmittance of 20–40% which provides sufficient illumination, and specular reflectance of 10% in the visible region which minimizes glare are typical in these glazings. Optical transmittance in the near infrared region is  $< 10\%$  for these glazings, which leads to reduced thermal load in the interior under solar irradiation. The evaluation of the optical behaviour of the laminated glazings, avilcrasol, was done following the ISO 9050:2003 standard, where AM1.5 ( $850 \text{ W/m}^2$ ) solar spectral irradiance along with sensitivity of human eye for daylight vision was considered. In order to evaluate the thermal behaviour of avilcrasol under different ambient, a previously reported computer program was used. It was found that installation of avilcrasol with total solar transmittance, reflectance and absorptance values of 0.08–0.22, 0.09–0.11 and 0.66–0.83, respectively, in architectural or automobile windows would reduce the thermal load of the interior by 40%–50%, as compared with windows with conventional glazings. This would enable significant energy saving in air conditioning. The mechanical properties of avilcrasol were evaluated for the first time, using compressive-shear stress adhesion test. The results showed that in the case of avilcrasol involving the coatings applied on glass substrates, generally there is no significant effect on adhesive resistance compared with those of clear glass laminates. The adhesion of avilcrasol is a function of the type and thickness of the thin films deposited. The best results were obtained for the avilcrasol with thin film of copper sulphide and copper selenide deposited on glass coated with zinc sulphide as substrate films. The values of adhesion resistance of such glazings are in the 9–12 MPa range, which are appropriate for architectural and automotive window applications. Similar optical and electrical characteristics were observed for avilcrasol which incorporates semiconductor coatings on PET sheets. However, the mechanical behaviour in general was inferior. Based on the practical experience gained during the development of the present project, criteria for the selection of the solar control laminated glass for diverse applications in tropical locations were established. Recommendations are made for the use of a selection of fourteen different avilcrasol types developed in this work for distinct architectural and automotive applications. The technological perspectives of the present work are promising. Hopefully, the transcendence of the present work including the realization of the future research proposed at the end may have a potential to make a positive impact in the reduction of energy consumption at a national level.

# TABLA DE CONTENIDO

	Páginas
Nomenclatura	i
Lista de Tablas	iii
Lista de Figuras	v
<b>Capítulo 1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1 Antecedentes	1
1.2 Revisión Bibliográfica	4
1.2.1 Películas de Control Solar	4
1.2.2 Transferencia de Calor en Vidrios con Películas Espectralmente Selectivas	8
1.2.3 Propiedades Mecánicas de Vidrios Laminados	11
1.3 Objetivo	24
<b>Capítulo 2. Desarrollo Experimental</b>	<b>31</b>
2.1 Depósito Químico y Tratamientos Superficiales	31
2.1.1 Tratamientos Superficiales con Soluciones Ácidas y Básicas	32
2.1.2 Tratamientos Superficiales al PET con Organosilanos	35
2.1.3 Tratamientos Superficiales con Películas de Sulfuro de Zinc (ZnS)	36
2.1.4 Selección de la Superficie de Vidrio a Utilizar para el Depósito de PDS	37
2.1.5 Depósito de Películas Delgadas de CuS	39
2.1.6 Depósito Químico de Películas Delgadas de $\text{Cu}_{2-x}\text{Se}$	45
2.2. Proceso de Laminación de los <i>Avilcrasol</i>	47
2.2.1 Tipos de <i>Avilcrasol</i> Utilizados	48
2.2.2 Especificaciones del PVB	49
2.2.3 Proceso de Pre-Laminación	53
2.2.4 Proceso de Laminación	54
2.3 Preparación de Probetas para Pruebas de Resistencia Adhesiva	56
2.3.1 Obtención de las Probetas para las Pruebas de Corte-Compresivo	56
2.4 Caracterización Óptica	62
2.5 Medición de la Resistencia Adhesiva de los <i>Avilcrasol</i>	67
2.6 Pruebas de Impacto a los <i>Avilcrasol</i>	70
2.6.1 Características de la Prueba de Impacto	71
2.7 Conclusiones	75
<b>Capítulo 3. <i>Avilcrasol</i> con Películas Delgadas Semiconductoras de ZnS, CuS, ZnS-CuS y ZnS-CuS-<math>\text{Cu}_{2-x}\text{Se}</math> Sobre Vidrio</b>	<b>79</b>
3.1 Generalidades	80
3.2 Depósito Químico de Películas Delgadas de ZnS-CuS y CuS	81
3.2.1 Depósito Químico de Películas Delgadas de ZnS	81
3.2.2 Depósito Químico de películas Delgadas de CuS	81
3.2.3 Proceso de Laminación	82
3.3 Caracterización	83
3.3.1 Caracterización Óptica	83

3.3.2 Pruebas de Adhesión	83
3.4 Resultados y Discusión	84
3.4.1 Caracterización Óptica	84
3.4.2 Caracterización Mecánica	89
3.4.3 Modificación de las Propiedades Ópticas y Mecánicas con la Adición de una Película Delgada de $\text{Cu}_{2-x}\text{Se}$ .	93
3.5 Conclusiones	97
<b>Capítulo 4. <i>Avilcrasol</i> con Películas Delgadas Semiconductoras de CuS y <math>\text{CuS-Cu}_{2-x}\text{Se}</math> Depositadas Sobre PET</b>	101
4.1 Generalidades	102
4.2 Depósito Químico de Películas Delgadas de CuS y $\text{Cu}_{2-x}\text{Se}$	103
4.3 Configuración de los <i>Avilcrasol</i> y Proceso de Laminación	103
4.4 Caracterización	104
4.4.1 Caracterización Óptica	104
4.4.2 Pruebas de Adhesión	106
4.5 Pruebas Preliminares de Adhesión a los <i>Avilcrasol</i> con PET	106
4.6 Resultados y Discusión	109
4.6.1 Caracterización Óptica	109
4.6.2 Caracterización Mecánica	112
4.7 Conclusiones	115
<b>Capítulo 5. Criterios de Selección de los <i>Avilcrasol</i></b>	117
5.1 Generalidades	118
5.2 Correlación de las Propiedades Ópticas y Térmicas	119
5.2.1 Balance Térmico de los <i>Avilcrasol</i> utilizados	120
5.3 Criterios de Selección de los <i>Avilcrasol</i> de Acuerdo a la Zona Geográfica de Aplicación	123
5.3.1 Geometría Solar	124
5.3.2 Resistencia Adhesiva de los <i>Avilcrasol</i> a los Fenómenos Climatológicos	127
5.3.3 <i>Avilcrasol</i> en Aplicaciones Automotrices	128
5.4 Resultados y Discusión	131
5.5 Conclusiones	134
<b>Capítulo 6. Conclusiones y Trabajos Futuros</b>	137
6.1 Conclusiones	138
6.2 Trabajos Futuros	141
6.3 Publicaciones Derivadas de este Trabajo de Tesis	143
<b>Apéndice A. Aspectos generales de los Arreglos de Vidrios Laminados Controladores de la Radiación Solar (<i>AVILCRASOL</i>)</b>	147
<b>Apéndice B. Resistencia Adhesiva (Análisis de Varianza)</b>	181
<b>Apéndice C. Diseño de Pistola de Aire para Pruebas de Impacto</b>	185
<b>Apéndice D. Irradiancia Solar para Cinco Ciudades de Aplicación de los <i>Avilcrasol</i>.</b>	187

## NOMENCLATURA

Símbolo	Descripción	Unidades
A	Absortancia óptica	%
AM	Masa de aire	Adimensional
B	Inducción magnética	T
C <sub>p</sub>	Calor específico	kJ/kg K
E	Campo eléctrico	V/m
E <sub>g</sub>	Brecha de Energía	eV
F	Estadístico para análisis de varianza	Adimensional
G	Irradiancia solar	W/m <sup>2</sup>
h	Coefficiente convectivo de transferencia de calor	W/m <sup>2</sup> K
H <sub>0</sub>	Hipótesis nula	Adimensional
H <sub>1</sub>	Hipótesis alterna	Adimensional
I <sub>x</sub>	Intensidad de luz	W/m <sup>2</sup>
k	Conductividad térmica	W/m K
L	Espesor del vidrio	m
LSG	Ganancia de luz Solar	Adimensional
n <sub>a</sub>	Número de probetas del <i>avilcrasol</i> 1	Adimensional
n <sub>b</sub>	Número de probetas del <i>avilcrasol</i> 2	Adimensional
N	Número de probetas totales	Adimensional
q	Flujo de calor	W/m <sup>2</sup>
q <sub>A</sub>	Flujo de calor absorbido	W/m <sup>2</sup>
q <sub>R</sub>	Flujo de calor reflejado	W/m <sup>2</sup>
q <sub>T</sub>	Flujo de calor transmitido	W/m <sup>2</sup>
q <sub>RC</sub>	Flujo de calor por radiación y convección	W/m <sup>2</sup>
R	Reflectancia óptica	%
$\bar{s}_B^2$	Varianza dentro de una muestra	
$\bar{s}_W^2$	Varianza entre n muestras	
SC	Coefficiente de sombreado ( <i>Shading Coefficient</i> )	Adimensional
SHGC	Coefficiente de ganancia de calor solar ( <i>Solar Heat Gain Coefficient</i> )	Adimensional
t	Tiempo	s
T	Transmitancia óptica	%
T	Temperatura	K
U	Coefficiente total de transferencia de calor del vidrio	W/m <sup>2</sup> K
v	Velocidad del viento	m/s
c	Velocidad de la luz en vacío [2.99 x 10 <sup>8</sup> ]	m/s
z	Dirección del campo magnético	Adimensional
<b>Griegas</b>		
α	Absortancia	Adimensional
α <sub>c</sub>	Coefficiente de absorción óptica de portadores libres	1/m
δ	Difusividad térmica	m <sup>2</sup> /s

$\Delta\lambda$	Intervalo de longitud de onda	nm
$\varepsilon$	Permitividad	F/m
$\varepsilon_0$	Permitividad en el vacío, $8.85 \times 10^{-12}$	Fm/1
$\varepsilon_r$	Permitividad relativa	Adimensional
E	Emisividad	Adimensional
$\phi$	Ángulo zenital	Grados
$\lambda$	Longitud de onda	nm
$\mu$	Permeabilidad	H/m
$\mu_0$	Permeabilidad en el vacío, $4\pi \times 10^{-7}$	H/m
$\mu_r$	Permeabilidad relativa	Adimensional
$\nu$	Viscosidad cinemática	m <sup>2</sup> /s
$\pi$	Pi	Adimensional
$\rho$	Reflectancia	Adimensional
$\sigma$	Conductividad eléctrica	1/ $\Omega$ cm
$\tau$	Transmitancia	Adimensional
$\tau_c$	Esfuerzo cortante o cizalladura	MPa

### Subíndices

uv	Región espectral ultravioleta
v	Región espectral visible
nir	Región espectral del cercano infrarrojo
e	Región espectral solar total
g	Vidrio
p	Polímero
a	Aire
f	Película delgada
i	Interior
o	Exterior

## LISTA DE TABLAS

Tabla		Página
2.1	Tratamientos superficiales con soluciones ácidas y básicas..	33
2.2	Composición del baño químico para depositar películas delgadas de ZnS.	36
2.3	Composición del baño químico ("cittrato") para obtener las películas delgadas de CuS.	40
2.4	Baño químico "amoniaco" para depositar PDS de $Cu_xS$ .	43
2.5	Baños químicos para depositar películas de $Cu_{2-x}Se$ sobre PET.	45
2.6	Análisis estadístico de pruebas $F$ y $t$ de <i>student</i> para los <i>avilcrasol</i> a y b de la Figura 2.19.	59
2.7	Pruebas $F$ y $t$ de <i>student</i> para las zonas central y media del <i>avilcrasol</i> a.	61
2.8	Pruebas $F$ y $t$ de <i>student</i> para las zonas central y media del <i>avilcrasol</i> b.	61
2.9	Parámetros de control solar de las PDS mostradas en la Figura 2.22.	64
2.10	Parámetros ópticos de los vidrios laminados mostrados en la figura 2.23.	66
2.11	Parámetros de control solar estimados, para los vidrios laminados mostrados en la figura 2.24.	67
3.1	Parámetros de control solar en porcentaje de la transmitancia óptica (T), reflectancia especular (R) y absortancia (A) para las regiones (UV), visible (VIS), cercano infrarrojo (CIR) y toda la región espectral total (SOL) para vidrios laminados, utilizando diferentes tipos de películas delgadas, evaluados de acuerdo a D65.	86
3.2	Parámetros ópticos de los <i>avilcrasol</i> mostrados en la Figura 3.7.	95
4.1	Parámetros ópticos en % de los elementos componentes de un <i>avilcrasol</i> .	106
4.2	Esfuerzos cortantes máximos aplicados a los <i>avilcrasol</i> .	107
4.3	Propiedades ópticas de los <i>avilcrasol</i> que integran películas delgadas de CuS depositadas sobre hojas de PET con y sin tratamiento superficial con organosilanos. Como comparación se muestran además los parámetros ópticos de un vidrio claro de 3 mm de espesor y de un vidrio laminado sencillo.	111
5.1	Parámetros ópticos y térmicos de los componentes de un <i>avilcrasol</i> .	120

5.2	Propiedades ópticas de los diferentes <i>avilcrasol</i> desarrollados durante esta investigación.	123
5.3	Clasificación de los Huracanes de acuerdo a la escala de Saffir-Simpson.	128
5.4	Variación del SC, SHGC y ganancia de calor al interior con el coeficiente convectivo.	129
5.5	Guía para la selección de un <i>avilcrasol</i> con base en las características óptica, térmica y mecánica presentadas en este trabajo de tesis.	131
5.6	Características ópticas, térmicas y mecánicas de los <i>avilcrasol</i> desarrollados en esta investigación.	132
A.1	Niveles de blindaje en vidrios laminados.	156
A.2	Valores de pérdida de transmisión de sonido en vidrios.	158
D.1	Promedios de radiación solar (máxima pico) mensual en una superficie vertical ubicada en cinco ciudades diferentes.	187

## LISTA DE FIGURAS

Figuras	Descripción.	Página
2.1	Comparación de las películas de CuS sobre PET integradas a vidrios laminados con diferentes tratamientos superficiales y a diferentes duraciones de depósito: (a) 1 h, (b) 1.5 h, (c) 3h, (d) 4h y (e) 5h.	34
2.2	Recipiente para el depósito de PDS por CBD.	37
2.3	Morfología superficial mediante AFM de sustratos de (a) vidrio lado aire y (b) vidrio lado estaño.	38
2.4	Morfología superficial mediante AFM de vidrios depositados sobre lado aire y estaño con ZnS por 4h (a y b), 6h (c y d) y 8h (e y f) respectivamente.	39
2.5	Patrones de transmitancia óptica (T) y reflectancia especular (R) de películas de CuS, (a) horneadas y sin hornear, (b) sin hornear y laminadas y (c) horneadas y laminadas, depositadas sobre PET.	42
2.6	Espectros de transmitancia óptica (T) y reflectancia especular (R) de <i>avilcrasol</i> con y sin ZnS.	44
2.7	Transmitancia óptica y Reflectancia óptica de películas de CuS y CuS - Cu <sub>2-x</sub> Se sobre PET con una duración de depósito de 2 horas para el CuS y 5 min para el Cu <sub>2-x</sub> Se.	46
2.8	Transmitancia óptica y reflectancia óptica de PDS de Cu <sub>2-x</sub> Se depositadas sobre PET durante 1, 2, 3 y 4h, con espesores aproximados de 40 nm a 180 nm).	47
2.9	Transmitancia óptica de vidrios laminados con EVA (2) y PVB (3) en la región del UV, comparada con un vidrio claro de 4 mm de espesor (1).	48
2.10	Elementos componentes de los <i>avilcrasol</i> y sus interfases.	49
2.11	Esquema de la cadena polimérica del PVB.	50
2.12	Variación del contenido de humedad del PVB respecto a la humedad relativa del aire.	51
2.13	Relación del contenido de humedad del PVB respecto al esfuerzo cortante máximo.	51

2.14	Absorción de humedad del PVB en función de la H. R. del aire.	52
2.15	Pre-laminación por rodillos.	54
2.16	Corte del <i>avilcrasol</i> para las pruebas de adhesión.	57
2.17	Distribución de la adhesión en vidrios laminados sencillos.	58
2.18	Selección de las tres zonas de análisis de un <i>avilcrasol</i> . Zona central (7, 8, 9, 12, 13 y 14 en color rojo), zona media (2-4, 6, 10, 11, 15, 17-19 en color naranja) y zona esquinas (1, 5, 16 y 20 en amarillo).	60
2.19	Propagación de la radiación electromagnética en un medio parcialmente conductor y que es un semiconductor.	63
2.20	Transmitancia (%) y Reflectancia (%) de películas delgadas de CuS y CuS -Cu <sub>2-x</sub> Se depositadas sobre vidrio, sin laminar. Antes de medir las películas, se homearon en nitrógeno a 140°C por 30 minutos para simular el proceso térmico a que se someten en el proceso de laminación.	64
2.21	Transmitancia (%) y Reflectancia (%) de PDS de CuS y CuS-Cu <sub>2-x</sub> Se laminadas.	65
2.22	Transmitancia (%) y Reflectancia (%) de vidrios laminados que incorporan películas de CuS y CuS-Cu <sub>2-x</sub> Se depositadas sobre PET.	66
2.23	Dispositivo para pruebas de adhesión.	68
2.24	Secuencia de una prueba de adhesión a un vidrio laminado.	68
2.25	Disprad, máquina universal y sistema de adquisición de datos para llevar a cabo pruebas de adhesión.	69
2.26	Curvas características de las pruebas de adhesión por corte compresivo.	70
2.27	Tipo de fractura de dos configuraciones diferentes de <i>avilcrasol</i> , (a) sencillo y (b) PET. Velocidad de impacto 35 m/s.	72
2.28	Sección transversal de los <i>avilcrasol</i> impactados con un proyectil de 2.2 g a 35 m/s (126 km/h).	73
2.29	Tipo de fractura de dos configuraciones diferentes de <i>avilcrasol</i> , (a) sencillo y (b) PET. Velocidad de impacto 45 m/s (162 km/h).	74
2.30	Sección transversal de un <i>avilcrasol</i> impactado con un proyectil de 2.2 g a 45 m/s (162 km/h).	74

3.1	Tipos de <i>avilcrasol</i> utilizados para su evaluación óptica y mecánica.	83
3.2	Transmitancia óptica (T%) y Reflectancia óptica (R%), de un vidrio claro de 4 mm de espesor y vidrios laminados que incorporan películas de ZnS en el lado aire de un vidrio claro de 2 mm de espesor.	85
3.3	Transmitancia óptica (T%), reflectancia especular (R%) de <i>avilcrasol</i> sencillo y con películas delgadas de ZnS (60 nm espesor), CuS (100 y 150 nm), ZnS-CuS y (100 y150 nm).	87
3.4	Esfuerzos cortantes máximos soportados antes de la falla del vidrio laminado fabricado con el lado aire (LA) en contacto con el PVB como referencia, y con películas delgadas de ZnS con espesores de 40, 60 y 80 nm depositadas en el lado estaño (LE) y lado aire (LA) en contacto con el PVB.	89
3.5	Esfuerzo cortante máximo soportado por vidrios laminados con películas delgadas de ZnS y ZnS/ZnO depositadas sobre el lado aire (LA) y en contacto con el PVB.	91
3.6	Esfuerzo cortante máximo soportado por vidrios laminados con películas delgadas de CuS y ZnS-CuS depositadas en el lado aire de un vidrio claro de 2 mm de espesor en contacto con el PVB.	92
3.7	Modificación óptica de los <i>avilcrasol</i> al depositar una película de Cu <sub>2-x</sub> Se sobre una película de CuS con espesores de 100 nm y 150 nm.	95
3.8	Esfuerzo cortante máximo soportado por los <i>avilcrasol</i> que integran películas delgadas de CuS, CuS-Cu <sub>2-x</sub> Se, ZnS-CuS y ZnS-CuS-Cu <sub>2-x</sub> Se, depositadas sobre el lado aire de ambos vidrios que lo forman.	96
4.1	Configuración de los <i>avilcrasol</i> que integran PET como sustrato para las películas delgadas de CuS y CuS-Cu <sub>2-x</sub> Se.	104
4.2	Espectros de transmitancia óptica (T%) y reflectancia óptica (R%) de los elementos componentes de un <i>avilcrasol</i> ).	105
4.3	Primer dispositivo para pruebas de adhesión ( <i>Disprad</i> ), para realizar ensayos a los <i>avilcrasol</i> con dimensiones de 10 cm x 10 cm.	107
4.4	<i>Avilcrasol</i> con PET sin tratamiento superficial después de la prueba de resistencia adhesiva por corte-compresivo.	108

4.5	<i>Avilcrasol</i> con PET tratado superficialmente con OS después de la prueba de resistencia adhesiva por corte-compresivo.	108
4.6	Espectros de Transmitancia (T%) y Reflectancia (R%) de películas delgadas de CuS depositadas sobre hojas de PET con y sin tratamiento superficial con organosilanos.	110
4.7	Espectros de T(%) y R(%) de películas delgadas de CuS depositadas sobre hojas de PET con una duración de depósito de 2 y 4 h.	110
4.8	Resistencia adhesiva máxima de los <i>avilcrasol</i> que integran hojas de PET con PDS de CuS. Se utilizaron hojas de PET con y sin tratamiento superficial con organosilanos.	113
4.9	Curvas representativas de las pruebas de resistencia adhesiva realizadas a los <i>avilcrasol</i> que integran hojas de PET depositadas con PDS de CuS por 2 h. <b>(a)</b> PET sin tratamiento superficial y <b>(b)</b> PET con tratamiento superficial con organosilanos.	114
4.10	En ésta fotografía se muestran las interfases de falla de los <i>avilcrasol</i> que integran hojas de PET sin tratamiento superficial. Se observa que todas se separaron completamente durante la prueba de adhesión por corte-compresivo.	114
5.1	Radiación térmica y transmitancia de energía solar en un vidrio monolítico de 3 mm de espesor.	120
5.2	Radiación térmica y transmitancia de energía solar en un <i>avilcrasol</i> que integra dos películas delgadas semiconductoras de CuS, ZnS-CuS, CuS-Cu <sub>2-x</sub> Se o ZnS-CuS-Cu <sub>2-x</sub> Se depositadas químicamente.	121
5.3	Radiación térmica y transmitancia de energía solar en un <i>avilcrasol</i> que integra una película delgada semiconductoras de CuS, ZnS-CuS, CuS-Cu <sub>2-x</sub> Se o ZnS-CuS-Cu <sub>2-x</sub> Se depositada químicamente sobre una hoja de PET.	121
5.4	Ubicación geográfica de las ciudades seleccionadas para instalar los <i>avilcrasol</i> .	124
5.5	Trayectoria solar para los días 11 de junio, (a) y (c), 10 de diciembre, (b) y (d) en las ciudades de Tampico y Tijuana, respectivamente.	126

5.6	Variación de la carga térmica al interior respecto al coeficiente convectivo de transferencia de calor, $h_o$ .	130
5.7	Variación del SHGC respecto al coeficiente convectivo de transferencia de calor, $h_o$ .	130
A.1	Transmitancia $T$ y Reflectancia $R$ características de un recubrimiento controlador de la radiación solar ideal, mostradas a lo largo del espectro normalizado de la distribución de irradiancia espectral $G_\lambda$ con un espectro solar AM2 y la dependencia espectral normalizada de sensibilidad $S_\lambda$ del ojo humano en luz de día.	148
A.2	Variación de la $\tau$ , $\rho$ y $\alpha$ con el ángulo de incidencia de vidrios a) templado, b)claro y c) absorbente.	149
A.3	Propagación de una onda electromagnética.	152
A.4	Sistema automatizado para producción de vidrio laminado.	159
A.5	Autoclave para laminación de vidrio, CIE-UNAM	161
A.6	Calentamiento en un Autoclave.	161
A.7	Balance térmico en un vidrio monolítico claro.	166
A.8	Coefficiente de sombreado respecto al coeficiente convectivo de transferencia de calor y absortancia.	168
A.9	Prueba de Pummel.	170
A.10	Diagrama de Evaluación Pummel.	171
A.11	Dispositivo para pruebas de resistencia adhesiva.	171
A.12	Dispositivo para pruebas de resistencia adhesiva.	173
A.13	Vidrio laminado de 3 hojas para prueba de corte.	173
A.14	Dispositivo para pruebas de ruptura por deslizamiento.	174
A.15	Esquema para Pruebas de Adhesión por Corte – Compresión (Modificación de la versión presentada por Jagota.	175

# **CAPÍTULO 1**

## **INTRODUCCIÓN**

En este Capítulo se presenta la justificación, la revisión bibliográfica y el objetivo de este trabajo de investigación. En la primera parte se presenta el problema de la ganancia de calor a través de las ventanas de edificaciones y automóviles y las ventajas que se tienen al utilizar películas delgadas espectralmente selectivas. En la revisión bibliográfica se presentan estudios previos sobre: depósito químico de películas delgadas semiconductoras espectralmente selectivas, transferencia de calor en vidrios laminados que integran las películas mencionadas anteriormente y el comportamiento mecánico de vidrios laminados sujetos a cargas de viento, impacto y esfuerzos cortantes y compresivos. En la última se presenta el objetivo que motivó a desarrollar este trabajo de investigación y una descripción capitular.

### **1.1 Antecedentes**

De acuerdo a la Secretaría de Energía [1], la demanda de energía se ha incrementado como resultado de la dinámica de la economía mundial y las expectativas a mediano plazo plantean que seguirá en aumento, utilizando en su mayor parte combustibles

fósiles. No se ven posibilidades en un plazo razonable de que puedan ser sustituidos en forma significativa por otras fuentes de energía, como las renovables. Entre sus ventajas están; sustentabilidad, ya que son capaces de preservar las fuentes, garantizan la seguridad y diversidad del suministro energético, disponibilidad de servicios de energía virtualmente sin impacto ambiental, contribuyendo a la protección del ecosistema de las generaciones presente y futuras. En los últimos años se ha visto una clara tendencia hacia la baja de los costos en los equipos de energías renovables.

Dado que las reservas de fuentes de energía no renovables se reducen aceleradamente día a día, se debe hacer conciencia y diversificar el uso de fuentes de energía renovable, como son la solar, eólica, maremotriz, biomasa (en forma de biogás) e hidráulica (mini-hidráulica). Este trabajo de tesis representa una contribución en el área de ahorro de energía, ya que al reducir la carga térmica, producto de la incidencia de la radiación solar, al interior de las edificaciones o automóviles se obtiene un ahorro de energía eléctrica por el uso de sistemas de acondicionamiento de aire.

Las nuevas tendencias en la industria arquitectónica durante los últimos años es la construcción de edificios tipo torre con grandes áreas de envidriados o ventanas, las cuales, en algunos casos cubre la totalidad de edificio. Sin embargo en la mayoría de estas construcciones se utilizan materiales que ignoran las condiciones climáticas del lugar, ya que no existen normas vigentes que establezcan los tipos de materiales a utilizar para ahorrar energía por conceptos de iluminación y acondicionamiento del aire. Las construcciones que se encuentran en las zonas cálidas del país con este tipo de arquitectura, requieren de sistemas mecánicos y eléctricos para acondicionar el ambiente, lo que representa un elevado costo de operación y mantenimiento. La causa principal de esto es la ganancia térmica, es decir el aumento de temperatura en las habitaciones, la cual se da a través de ventanas, paredes, techos y pisos. La ganancia térmica mayor se da a través de las ventanas, y a causa de esto, la temperatura en las habitaciones aumenta considerablemente.

El empleo de vidrio claro, del tipo cal-sosa (*soda-lime*), en las ventanas provoca una transmisión de calor del 80% aproximadamente, según el espesor que se utilice, lo que provoca un incremento de temperatura en el interior de las habitaciones [2]. Para reducir esta ganancia de calor se utilizan vidrios atérmicos, llamados así porque reducen la carga térmica al interior de la edificación. Entre los tipos de vidrios atérmicos se encuentran los absorbentes (entintados), reflejantes (película metálica de recubrimiento en una de sus caras) y para el control de la radiación solar o filtros solares. En estos últimos se depositan químicamente películas de semiconductores para controlar o filtrar el paso de la radiación solar en sus diferentes regiones espectrales, a las habitaciones, reduciendo con esto la ganancia térmica.

En los edificios tipo torre con grandes superficies de envidriados, el uso de acondicionadores de aire contribuye grandemente en la demanda de energía eléctrica, por lo que se deben utilizar vidrios atérmicos para disminuir la carga térmica y contribuir en la conservación de combustibles fósiles y del medio ambiente. Además del inconveniente de la transferencia de calor en éste tipo de envidriados, se presenta el de seguridad, ya que en edificaciones que están expuestas a fenómenos meteorológicos tales como huracanes, tormentas o depresiones tropicales, etc., se corre el riesgo de fractura y ruptura en los vidrios de las ventanas, a causa de los fuertes vientos. En muchos casos es necesario proteger los envidriados con madera, o con cinta adhesiva, para evitar que los fragmentos del vidrio causen daños a las personas que habitan el edificio si es que éste llega a romperse.

La motivación que se tuvo para desarrollar este trabajo de tesis es que en la actualidad no existe en el mercado mexicano un producto que proporcione las características de ahorro de energía y seguridad ante actos vandálicos y desastres naturales al mismo tiempo. Aquí se proponen diversos arreglos de vidrios laminados controladores de la radiación solar, que cumplen con características ópticas, térmicas y mecánicas aceptables para su uso como vidrios de control solar y de seguridad simultáneamente.

## **1.2 Revisión Bibliográfica**

Es necesario tener conocimiento de tres áreas de investigación para el desarrollo de este trabajo, que son propiedades ópticas de películas de control solar, transferencia de calor a través de vidrios laminados que utilizan éstas películas y finalmente propiedades mecánicas de estos vidrios. Por esta razón, la revisión bibliográfica se divide en tres áreas, las que se presentan a continuación.

### **1.2.1 Películas de Control Solar**

Hace casi cuarenta años los vidrios con recubrimientos de control solar para aplicaciones arquitectónicas no eran tomados en cuenta en el diseño de edificios. Era la época de la energía barata y los controladores del mercado no habían surgido aún para formar las bases de lo que se convirtió en uno de los segmentos de más rápido crecimiento en la industria del vidrio plano. De 1965 a la fecha ocurrió un aumento en el desarrollo de los negocios de vidrio plano recubierto. Vidrios de hasta tres metros de ancho, se recubren con enormes máquinas que consisten de hasta 33 cátodos operando en once cámaras de depósito. Las cantidades de vidrio que se pueden recubrir con éste equipo alcanzan casi los doscientos mil metros cuadrados por mes. En la actualidad los fabricantes pueden producir virtualmente un rango ilimitado de recubrimientos en una gran variedad de vidrios [3].

En la década de los 70's, Libby Owens Ford (LOF) construye el primer sistema para recubrir vidrio en línea a gran escala. El sistema de depósito por electrones de LOF fue capaz de procesar hojas de vidrio de 3 a 3.6 metros de ancho en una operación semi continua que podía depositar una o más capas de recubrimiento sobre vidrio. Los materiales típicamente depositados por este método son metales (Cr, Ti, Ag, acero inoxidable), nitruros de metales (CrN, TiN, ZrN) y óxidos de metales (con un alto índice de dieléctricos, tales como SnO<sub>2</sub>, TiO<sub>2</sub> y ZnO) [4]. Las propiedades ópticas de estas películas son diversas y combinando materiales y espesores de película se obtienen vidrios decorativos para su uso en arquitectura.

A partir de la década de los 70's el mercado de los vidrios con recubrimiento de control solar se ha incrementado de manera sorprendente. En la actualidad podemos encontrar en el mercado una amplia variedad de vidrios de control solar, desde los entintados y reflejantes hasta los de baja emisividad y de doble envidriado también conocidos como duvent. La mayoría de éstos vidrios se depositan por la técnica de pulverización catódica (sputtering) la cual resulta costosa, ya que se requiere de equipo especial, como son las bombas de alto vacío, los magnetrones, las cámaras de vacío etc. Los altos costos de producción de los vidrios de control solar han llevado a la búsqueda de técnicas más económicas para la obtención de películas de control solar, entre éstas técnicas están el depósito por baño químico (DBQ), sol -gel, depósito electroquímico, etc.

Desde 1989, la Coordinación de Recubrimientos Ópticos y Opto-electrónicos (ROO) del Centro de Investigación en Energía, ha trabajado en la obtención de recubrimientos de control solar por la técnica de DBQ, la cual resulta económica si tomamos en cuenta que no se requieren equipos costosos para la obtención de las películas delgadas. En la actualidad se cuenta con una gran variedad de materiales que presentan buenas características para su aplicación como filtros solares o controladores de la radiación solar.

Este grupo [5-8], reportó las características ópticas de películas delgadas de Sulfuro de Cobre ( $\text{Cu}_x\text{S}$ ), Sulfuro de Plomo (PbS) y una combinación de éstas. Depositaron películas delgadas por la técnica de depósito por baño químico (DQB) sobre substratos de vidrio. Al hornear las películas de  $\text{CuS}$  a  $150^\circ\text{C}$  se demostró que ofrecen características de transmisión y reflexión ópticas cercanas a las ideales para el control solar. El espectro de transmisión de las películas delgadas de  $\text{CuS}$  en la región visible es muy similar al espectro de visión fotópica o de sensibilidad del ojo humano, y con una transmitancia de  $\approx 30\%$  para la luz del día proporciona una iluminación verde amarilla al interior de la habitación. Combinando películas de  $\text{PbS-Cu}_x\text{S}$  se obtienen colores agradables a la vista con el reflejo de la luz del día como son: azulado, verdoso, verde amarillo, etc., además de una baja transmitancia en la región del cercano

infrarrojo (NIR), los cuales no se pueden obtener solamente con la película de PbS. Por la variedad de tonalidades que ofrecen este tipo de películas tienen gran potencial para su aplicación en envidriados arquitectónicos.

En años posteriores, reportaron otros tipos de materiales con características de control solar, como las películas de  $\text{Bi}_2\text{S}_3 - \text{Cu}_x\text{S}$  [9] que presentaban características ópticas de un controlador solar, como una transmitancia en el visible de 25 a 35% y horneando a  $150^\circ$  durante una hora, estos valores se reducían de 10 a 20%. Optimizaron los depósitos químicos [10] para la obtención de películas delgadas de  $\text{Cu}_x\text{S}$  en diferentes áreas con el propósito de aplicarse a escala industrial y se propuso utilizar polímeros como protección de las películas depositadas. Otro material [11] que presenta características de control solar es el  $\text{SnS-Cu}_x\text{S}$  (sulfuro de estaño-sulfuro de cobre), tiene una baja reflectancia en el visible (menos del 10%) que lo hace satisfactorio para su aplicación en parabrisas de automóviles.

Las películas antes obtenidas [5-11] presentaron problemas de estabilidad ambiental, se degradaban al ser expuestas al medio ambiente durante tiempos prolongados, esto propiciaba su desprendimiento. Este problema condujo a buscar una manera de proteger las películas del medio ambiente. En 1991, Fernández y Nair [12] presentaron características ópticas de películas de  $\text{CuS}$ ,  $\text{PbS-CuS}$  y  $\text{PbS}$  depositadas por DBQ sobre sustratos de vidrio. Estas películas fueron recubiertas con resinas aromáticas (barniz) para protegerlas principalmente del proceso de limpieza, además de la degradación al medio ambiente. Sin embargo este procedimiento no dio los resultados esperados, ya que la exposición prolongada al sol degradaba la película y ésta se desprendía junto con el barniz protector.

Una problemática que surgió con la técnica de DBQ fue la adhesión de las películas a los sustratos de vidrios, ya que a determinado tiempo de crecimiento, las películas se desprendían del vidrio. Buscando alternativas que permitieran mejorar la adhesión de las películas al vidrio se encontró que las películas delgadas de  $\text{ZnS}$  [13,14] mejoran esta condición. Al depositar  $\text{ZnS}$  sobre vidrio como sustrato y posteriormente películas

delgadas de  $\text{Cu}_x\text{S}$ ,  $\text{Bi}_2\text{S}_3$ ,  $\text{PbS}$  o una combinación de ellas, es posible mejorar la adhesión de éstas al vidrio, logrando con ello mayores espesores de película y por tanto mejores propiedades ópticas.

Se tienen estudios por XPS [14] de la difusión interfacial de átomos metálicos durante el proceso de horneado de películas delgadas de  $\text{ZnS-CuS}$  y  $\text{PbS-CuS}$ . La caracterización óptica y eléctrica de estas películas demostró que el proceso de difusión contribuye a reforzar la estabilidad térmica de las mismas. Otro método [15] utilizado en el mejoramiento de la adhesión de las películas de control solar es el tratamiento superficial a sustratos de vidrio con organosilanos. Este tipo de tratamiento superficial permite utilizar baños químicos libres de amoníaco para la obtención de películas delgadas de  $\text{CuS}$ .

Con el mejoramiento de la adhesión de las películas delgadas a los sustratos de vidrio se extendió su aplicación en áreas grandes. Para 1997, Nair [16] *et al.*, presentaron la viabilidad de producir vidrio de seguridad hecho de hojas de vidrio de 3 mm de espesor cubiertas químicamente con películas delgadas de depósitos de  $\text{CuS}$ ,  $\text{ZnS-CuS}$ ,  $\text{Sb}_2\text{S}_3\text{-CuS}$ , y  $\text{PbS-CuS}$ . Estos recubrimientos se laminaron usando PVB (Poly-Vinyl-Butiral) disponible comercialmente, basando la laminación en hojas de polímero y hojas limpias de vidrio a temperaturas de  $120^\circ\text{C}$  a  $140^\circ\text{C}$  con una presión de  $10\text{-}12\text{ kg/cm}^2$  en una autoclave. Los espectros de reflectancia y transmitancia de los vidrios de seguridad mostraron que hay una amplia elección de parámetros de control solar que son posibles con estos vidrios.

Los depósitos de las películas semiconductoras sobre hojas de vidrio, para su aplicación como recubrimientos para el control de la radiación solar, requiere de un alto grado de limpieza de los vidrios planos. La falta de limpieza ocasiona no-uniformidad y desprendimientos en los depósitos, como se ha mencionado en los trabajos citados anteriormente. Para evitar esta problemática, y además para eliminar el manejo de vidrios a causa del riesgo que representa trabajar con ellos y con los altos requerimientos en la mano de obra para su producción industrial, se ha sugerido [17] el

uso de hojas de tereftalato de polietileno (PET) para el depósito de películas de CuS. Las películas poseen alta conductividad eléctrica, y por tanto una alta reflectancia en el infrarrojo, que proporciona las características ópticas adecuadas para su aplicación como recubrimiento para el control de la radiación solar.

En el 2002 Correa [18] presenta una investigación donde obtiene películas de control solar de  $\text{Cu}_2\text{O-CuS}$  y  $\text{VO}_2$ . Las películas de  $\text{VO}_2$  son térmicamente activas, es decir sus propiedades ópticas se modifican conforme a cambios en las temperaturas a las que se encuentren expuestas. Esta capacidad de respuesta a los efectos del medio ambiente se puede conseguir mediante una serie de procesos físicos y químicos en un gran número de sustancias, dicho fenómeno recibe el nombre de "cromogénesis" (del latín "crom a= color y génesis = creación). Los valores de transmitancia y reflectancia en la región del visible son de 66.6% y 13.7% respectivamente cuando se encuentran a una temperatura menor a 68°C y de 52.1% y 48.8% cuando se encuentran arriba de esta temperatura.

Nebojsa y Salaifhar [19] presentan un estudio sobre la factibilidad de utilizar ventanas electrocrómicas en automóviles. Realizaron un estudio de la carga térmica a través de ventanas electrocrómicas desarrollados por ellos y de productos disponibles comercialmente. Estudiaron tres estados diferentes de visibilidad para el control de la radiación solar. El primero de ellos tiene el 73% de visibilidad y representa a un vidrio claro; 33% de visibilidad representa al estado intermedio y el 18% de visibilidad representa al estado oscuro. El estudio realizado mostró que aún con las mejoras que requiere esta tecnología, en cuanto a la durabilidad de las ventanas, las propiedades ópticas de éstas proporcionan un nivel de confort alto en comparación con las disponibles comercialmente. Las ventanas electrocrómicas proporcionan al menos 2.5 veces mejores resultados en la transmitancia de carga térmica en un vehículo.

### **1.2.2 Transferencia de Calor en Vidrios con Películas Espectralmente Selectivas**

Los primeros estudios de la transferencia de calor en vidrios con películas semiconductoras para el control de la radiación solar desarrolladas en el CIE-UNAM

fueron presentados por Estrada *et al.* [20], donde analizan el comportamiento térmico de películas delgadas de SnS-Cu<sub>x</sub>S por medio de un modelo matemático. El análisis térmico presenta un balance de energía diferencial en el vidrio y la película para una incidencia de radiación solar normal a la superficie. El modelo es unidimensional, para estado estacionario y considera transferencia de calor por conducción, convección y radiación. Los resultados presentan el coeficiente de sombreado del vidrio respecto a la temperatura exterior para dos películas específicas.

El modelo matemático anterior se extendió para analizar vidrios con películas de control solar del tipo Cu<sub>x</sub>S, PbS, PbS-Cu<sub>x</sub>S, SnS- Cu<sub>x</sub>S y ZnS- Cu<sub>x</sub>S [21], los valores de coeficiente de sombreado para estas películas fue de 0.3 a 0.75, dependiendo de las características ópticas y de las temperaturas exteriores. En 1994 [22] Álvarez *et al.*, presentan resultados teóricos y experimentales de la transferencia de calor en estado transitorio de un vidrio con controlador óptico. El modelo permite predecir el comportamiento térmico de vidrios con controladores ópticos depositados por DBQ. El modelo es unidimensional, en estado transitorio y considera transferencia de calor por conducción, convección y radiación. El modelo teórico predice el comportamiento térmico transitorio del sistema vidrio-película dentro de un error porcentual del 6.7%.

En el mismo año, Álvarez y Estrada [23] realizan un estudio teórico de la transferencia de calor en una cavidad cuadrada con ventana con controlador óptico. Este estudio se enfoca a la comprensión de cómo se lleva a cabo la ganancia de calor por radiación solar en habitaciones que tengan ventanas con controladores ópticos. El estudio presenta las distribuciones de temperaturas y velocidades dentro de la cavidad, así como gráficas del número de Nusselt (Nu) contra el tiempo. Los estudios anteriores [20-23] se realizaron a vidrios con películas de control solar depositadas sobre vidrio protegidas con barniz [12].

En 1998, Flores *et al.*, [24] presentan un estudio teórico-experimental para determinar el coeficiente de sombreado de vidrios laminados con dos filtros solares. Se analizaron vidrios laminados con películas delgadas de Cu<sub>x</sub>S y ZnS-PbS; se determinó tanto

teórica como experimentalmente la redistribución de la energía solar absorbida por la muestra y de ahí el coeficiente de sombreado (SC en inglés). Los resultados del modelo matemático se compararon con los resultados experimentales, resultando ser concordantes. Se observó que los vidrios laminados analizados, rechazan alrededor de un 51% la entrada de energía.

Por su parte, en 1998, Álvarez *et al.* [25] presentaron un modelo matemático unidimensional transitorio, que permite la predicción del comportamiento térmico de vidrios laminados con y sin películas delgadas de control solar, además de su validación experimental. Para la validación experimental, el recubrimiento utilizado fue una capa delgada de  $\text{Cu}_x\text{S}$  colocada entre el polímero y una de las hojas de vidrios. Se consideró transferencia de calor por conducción en las hojas de vidrio y transferencia de calor por convección y radiación en los lados interior y exterior de la habitación. La máxima diferencia entre los resultados teóricos y los experimentales fue de 3.6%. Para estado estable, la predicción de temperaturas cayó dentro de la incertidumbre experimental de las mediciones ( $\pm 0.8^\circ\text{C}$ ). Con esto se estableció la validación del modelo teórico y su solución numérica.

Más tarde, Álvarez *et al.* [26] reportó un aparato y una metodología para evaluar el comportamiento térmico de envidriados con películas de control solar para ventanas. Este método de prueba se puede adecuar para evaluar envidriados con películas de control solar simples o múltiples. En este aparato se pueden analizar prácticamente cualquier configuración o arreglo de vidrio.

Un parámetro importante en el comportamiento térmico de los vidrios con películas de control solar, es la emitancia que poseen. Si la emitancia en la parte interna del vidrio (dentro de la habitación) es baja ( $< 0.5$ ) se reduce la ganancia de calor a la habitación, disipándose éste en gran parte al exterior de la habitación. Este motivó a Álvarez *et al.* [27] realizar un estudio sobre la influencia de la emitancia térmica en el desempeño de vidrios laminados de control solar. Un modelo matemático unidimensional en estado transitorio les permitió conocer la transferencia de calor por conducción del vidrio

laminado y la transferencia de calor por convección y radiación del mismo al interior de la habitación. Los resultados indicaron que cuando la emitancia disminuye, el coeficiente de sombreado disminuye de 10 a 20% para todos los casos considerados.

Álvarez *et al.* [28] en el 2005, reportan la preparación, caracterización óptica y modelado térmico de vidrios laminados con películas de control solar de ZnS-CuS y ZnS Bi<sub>2</sub>S<sub>3</sub> depositadas por baño químico. Los envidriados presentaron una transmitancia visible, pesada para el espectro solar D65 y la sensibilidad del ojo humano a la luz visible, de 36% o 14% con una absortancia solar de 71% o 78%, dependiendo del tipo de recubrimiento; ZnS-CuS o ZnS-Bi<sub>2</sub>S<sub>3</sub> respectivamente. Los resultados mostraron una reducción en el SHGC del 12-20%, dependiendo del tipo de envidriado y de las condiciones del viento.

### 1.2.3 Propiedades Mecánicas de Vidrios Laminados

El incremento en incidentes que involucran tormentas y huracanes causantes de fuertes daños a las edificaciones preocupó a la comunidad científica, por lo que se iniciaron estudios referentes al tema. Minor y Beason [29], realizaron un estudio en el que determinaron las causas del rompimiento de los envidriados de edificios sujetos a fuertes tormentas. Una de las causas es la presión local del viento y la otra es el impacto de los proyectiles contenidos en el viento sobre las ventanas. Reconocieron que los constructores de edificios los diseñan sin conocer las especificaciones y propiedades del vidrio, razón por la cual durante las tormentas o huracanes, el envidriado sufre daños.

Las grandes pérdidas económicas ocasionadas por los fenómenos meteorológicos fue un factor importante para que investigadores como Minor emprendieran estudios sobre el comportamiento de los envidriados de edificios al ser sometidos a cargas de viento e impacto de proyectiles a baja velocidad. Al principio de los 80's Minor y Metha [30] realizaron una revisión de los diseños y prácticas para fabricar ventanas de vidrio. En general, presentan una evaluación de las prácticas actuales en el diseño de vidrios para ventanas, para identificar nuevos factores importantes que se puedan considerar,

mediante informes técnicos y resúmenes de datos sobre propiedades del vidrio, así como del comportamiento de las ventanas. Encontró que las ráfagas de viento que golpean al edificio, producen presiones que actúan en el interior y exterior del vidrio de las ventanas.

El comportamiento del vidrio sujeto a presiones cíclicas de viento es tipo diafragma, por lo que trabajos como el de Vallabhan [31] permitieron conocer más detalles acerca de este comportamiento. Su trabajo permitía analizar por diferencias finitas el análisis no lineal de placas rectangulares de vidrio sujetas a cargas de viento. La respuesta de estas placas de vidrio es tal que, se experimentan grandes deflexiones laterales; así que, la respuesta llega a ser no lineal. Utilizó la teoría de placas de Von Karman para representar el tipo de comportamiento de la placa, grandes deflexiones con pequeñas deformaciones.

Los grandes fabricantes de vidrio en Estados Unidos de Norteamérica (EUA) proporcionaban valores de resistencia muy variables, que confundían a los diseñadores de envidriados. No se tomaba en cuenta el tipo de proceso de fabricación del vidrio y las fallas superficiales que éstos ocasionaban al vidrio. Con el propósito de mejorar los diseños de los envidriados, Beason y Morgan [32] desarrollaron un modelo para predicción de fallas en vidrios. El modelo relaciona la probabilidad de falla con las fallas superficiales y los esfuerzos inducidos; lo formularon incluyendo todos los factores que afectan la resistencia del vidrio, tales como la duración de la carga, área de la superficie, etc. Con esto proporcionaron las bases para resolver los problemas actuales en el diseño de envidriados.

### ***Vidrios laminados sujetos a impactos de proyectiles***

Para conocer cuáles eran las causas del rompimiento de los envidriados, Beason *et al.* [33] hicieron una verificación de los diseños de envidriados localizados en el centro de Houston, ya que éstos fueron dañados considerablemente a causa de los efectos del Huracán Alicia el 18 de agosto de 1983. Encontraron que los vidrios se dañaban con velocidades de viento menores a las de diseño, es decir, el espesor del vidrio y el

tamaño de los mismos no eran los adecuados para resistir las cargas de viento para las que fueron diseñados. Además, los resultados de su investigación sugieren que el impacto de proyectiles contenidos en el viento, principalmente grava de techumbres, fue la mayor causa de rompimiento de los envidriados. La razón por la que la magnitud de los daños en Houston fue grande, es que los códigos aplicables a edificios y los procedimientos de diseño no reconocían que los proyectiles contenidos en el viento eran la mayor causa de rompimiento de vidrios durante ráfagas de viento. Presentaron cambios específicos en códigos para el diseño de envidriados para reducir la magnitud de los daños en el futuro. Uno de estos cambios propuestos fue el uso de vidrios laminados.

A partir de éstas propuestas para modificar los códigos de diseño de envidriados en EUA, se iniciaron diversas investigaciones sobre vidrios laminados, referentes a su comportamiento mecánico a impacto y cargas cíclicas de viento. Una de ellas fue la de Behr *et al.* [34] quienes realizaron un análisis de esfuerzos en diversos vidrios laminados (vidrio / PVB / vidrio), para averiguar si su comportamiento era similar a una placa de vidrio monolítico del mismo espesor, o al de dos vidrios emparedados sin capa intermedia de polímero (PVB). Encontraron que los vidrios laminados a temperatura ambiente se comportan de manera muy similar a placas de vidrio monolítico con el mismo espesor nominal. A temperaturas elevadas (77°C), el comportamiento cambia y se asemeja al comportamiento de vidrios emparedados (sin hoja intermedia de PVB).

Los diseños para envidriados de edificios se basan en la resistencia del vidrio, sin embargo el deterioro del vidrio con la exposición al medio ambiente no era considerado. Norville y Minor [35] presentaron un estudio para determinar la resistencia de vidrios erosionados por el medio ambiente durante periodos prolongados de tiempo. Determinaron que la resistencia del vidrio disminuye con la exposición al medio ambiente, fenómeno denominado "erosión". Presentaron resultados de pruebas destructivas de varios juegos de placas de vidrios para ventanas, nuevos y erosionados, bajo presión lateral uniforme. Encontraron que los vidrios erosionados

fallaban a presiones hasta tres veces menores que los vidrios nuevos. Esta contribución fue de gran valía para los diseñadores de envidriados arquitectónicos.

### ***Vidrios laminados sujetos a presiones cíclicas laterales***

Otro punto de interés en el diseño de los envidriados es el montaje de los mismos. El comportamiento mecánico es diferente si estos están en contacto directo con la cancelería de metal o tienen soportes poliméricos para evitarlo. Vallabhan *et al.* [36] realizaron un estudio del comportamiento de vidrios sobre soportes elásticos, sometidos a presiones laterales. En esta investigación, modificaron el modelo presentado en [31], incluyendo condiciones donde la placa de vidrio se soporta elásticamente en la frontera. Los soportes se consideran lineales y no lineales. Se utiliza un procedimiento iterativo muy eficiente para resolver las ecuaciones no lineales.

Beason [37] presenta un procedimiento iterativo que se puede usar para calcular la respuesta estructural teórica de vidrios aislantes sellados (tipo duovent), sujetos a cargas laterales uniformes, así como a variaciones de presión atmosférica y temperatura. Mostraron que la variación de factores como el espesor de los vidrios exterior e interior, la presión atmosférica y el espacio de aire ocasionan cambios significantes en el comportamiento mecánico de los vidrios.

Buscando alternativas para mejorar la resistencia de los vidrios al impacto, Minor [38] *et al.* llevaron a cabo una investigación para determinar el comportamiento de los vidrios monolíticos con respecto a los vidrios laminados fabricados con vidrios recocidos, semi templados y templados con el mismo espesor nominal. Los vidrios se impactaron utilizando un rifle de aire y posteriormente fueron sometidos a ciclos de presión – vacío, con el objetivo de simular las cargas de viento durante un huracán. Variaron la temperatura de los vidrios para determinar como afecta ésta en la resistencia. Encontraron que un vidrio laminado tiene la misma resistencia que un vidrio monolítico del mismo espesor nominal cuando ambos se encuentran a temperatura ambiente, pero disminuye casi un 25% a 77°C. Además, encontraron que los vidrios laminados fabricados con vidrio semi templado y templado presentan una resistencia de tres a

cinco veces mayor, respectivamente, que los vidrios laminados fabricados con vidrio recocidos.

Vallabhan *et al.* [39] utilizando el modelo matemático citado en [36], reportan el comportamiento de vidrios aislantes (VA) sujetos a cargas de viento. Se utilizó silicón como soporte y separación de los vidrios para formar el VA. Como las placas de vidrio están separadas por un espacio de aire sellado, ocurre una compleja interacción entre el aire atrapado y las placas de vidrio. Los empaques para el montaje del vidrio se simularon como resortes continuos a lo largo de los cuatro extremos del VA. Utilizaron presiones laterales de 0.48 a 4.79 kPa para simular la carga del viento y los esfuerzos medidos en los vidrios fueron de 950 a 2713 psi dependiendo el tipo de VA. Los esfuerzos menores se presentaron en el centro de los VA y se incrementaron en las esquinas de los mismos.

Como una continuación del trabajo de Bher *et al.* [34], Pantelides *et al.* [40] presentaron los resultados experimentales del comportamiento post - rompimiento de vidrios laminados templados sujetos a cargas de viento. Utilizaron dos configuraciones diferentes de vidrios laminados, así como dos sistemas de anclaje diferentes. Las configuraciones de los vidrios fueron, vidrio/PVB/vidrio y vidrio/PVB/PET/PVB/vidrio. Establecieron dos criterios de prueba para relacionar los efectos de una tormenta severa. El primer criterio esta relacionado con el impacto de los proyectiles que arrastra el viento durante una tormenta; el segundo define la carga de viento cíclica que representa una tormenta severa de cuatro horas de duración. Los tres resultados principales de su investigación fueron: Primero la probabilidad de rompimientos de los vidrios laminados templados sujetos al impacto de pequeños proyectiles arrastrados por el viento es reducida. Segundo, los vidrios laminados semi-templados instalados con una base de silicón como anclaje, tienen un funcionamiento notablemente mejor que los sistemas de envidriado convencionales. Finalmente, los vidrios laminados semi templados con PVB / PET / PVB funcionan significativamente mejor que los vidrios con PVB solamente.

Norville *et al.* [41] realizaron pruebas de resistencia a vidrios monolíticos templados y semi templados y a vidrios laminados templados y semi templados. El objetivo perseguido fue determinar la resistencia de estos tipos de vidrios respecto a vidrios monolíticos y laminados recocidos con las mismas dimensiones. Sus resultados difieren a los de la norma ASTM E1300. Sin embargo, no tomaron en cuenta la condición superficial de los vidrios y esto es un gran problema, ya que la resistencia de un vidrio recocido nuevo esta sujeta a grandes variaciones dependiendo del tratamiento del vidrio. Beason [42] considera que son cuestionables los datos de la comparación de resistencias de los vidrios, ya que fueron obtenidos de vidrios con diferentes condiciones superficiales.

Vallabhan *et al.* [43] realizaron un análisis teórico experimental de vidrios laminados utilizados en arquitectura. En estudios anteriores se determinó que el comportamiento de los vidrios laminados está entre el de un vidrio monolítico y un vidrio emparedado (sin PVB). Sin embargo, para el tamaño de muestras utilizadas el comportamiento de un vidrio laminado es muy parecido al de un vidrio monolítico. La similitud de este comportamiento se atribuye al efecto de transferencia de corte de la hoja intermedia de PVB dentro del vidrio laminado. Como las placas se flexionan, a causa de las presiones laterales, se producen diferentes desplazamientos en la parte superior e inferior, y la hoja de PVB queda sujeta a esfuerzos cortantes. El esfuerzo cortante en el PVB interactúa con las placas produciendo momentos flexionantes y esfuerzos de membrana. Se midieron deformación y desplazamientos laterales máximos en cuatro puntos estratégicos, en la parte superior e inferior de los vidrios laminados, los cuales estaban sujetos a presiones laterales máximas de 6.8 kPa (1.0 psi). Compararon los análisis teórico y experimental, y obtuvieron un resultado muy aceptable.

Bher *et al.* [44] en 1993 realizaron una recopilación de información de aproximadamente 20 años para analizar el comportamiento de vidrios laminados sujetos a presiones laterales. Su investigación incluye definiciones de propiedades de materiales, análisis de esfuerzos teóricos y experimentales y pruebas destructivas a vidrios monolíticos, laminados y emparedados de diferentes geometrías. La preponderancia de los datos e

información indican que: (1) Los vidrios laminados de arquitectura se comportan de manera similar a los vidrios monolíticos del mismo espesor nominal bajo presiones laterales de corta duración (representativas de las cargas de viento) y temperaturas inferiores al ambiente; (2) la temperatura a la cual cambia el comportamiento de los vidrios laminados respecto a los monolíticos del mismo espesor nominal no está definida claramente, pero es alrededor de 49°C; y (3) los vidrios laminados de arquitectura se comportan de manera similar a los vidrios monolíticos del mismo espesor nominal bajo presiones laterales de larga duración (representativas de cargas de nieve) a temperaturas de 0°C (32°F) y menores.

### **Concepto de diseño de "la hoja de sacrificio" para vidrios laminados**

Continuando con las investigaciones sobre vidrios laminados resistentes a impactos Bher y Kremer [45] realizaron pruebas experimentales a diferentes sistemas de envidriado resistentes al rompimiento, a causa del impacto de proyectiles contenidos en el viento. Sus resultados indicaron que al incrementar el espesor de la hoja intermedia de PVB se reduce significativamente la probabilidad de fractura en la hoja interior de vidrio. Utilizaron dos configuraciones diferentes de hoja intermedia en el vidrio laminado, la primera fue solo PVB y la segunda, una combinación de PVB / PET / PVB. Encontraron además que la resistencia de los vidrios con una hoja intermedia de PVB / PET / PVB mostró una mejor resistencia a la fractura de la hoja interior durante el impacto, que al utilizar solo PVB. Sin embargo, la adición de PET a la hoja intermedia de PVB requiere de más material y costos de fabricación, y no se tiene la certeza de que la configuración PVB / PET / PVB sea más efectiva y que justifique el costo elevado respecto a una hoja de PVB de mayor espesor, para incrementar la resistencia al impacto de los vidrios laminados. Este estudio dio paso a lo que posteriormente se conoció como el criterio de diseño de la *hoja de sacrificio*.

Otra variante de los trabajos presentados por Vallabhan *et al.* [31,34] fue analizar, en 1997, los tipos de sujeción de envidriados arquitectónicos o envidriados estructurales [46]. Desarrollaron un modelo matemático para calcular los esfuerzos a que es sometido un vidrio laminado sujeto a cargas de viento. El tipo de envidriado estructural

más crítico es aquél que está soportado en sus cuatro extremos por empaques de silicón. Cuando un vidrio laminado se somete a cargas de viento y éstas generan deflexiones mayores al espesor del mismo vidrio, el comportamiento llega a ser no lineal, lo que crea una distribución de esfuerzos muy compleja en los soportes de silicón. Los resultados indicaron que el tamaño y las propiedades del soporte de silicón pueden afectar la eficiencia de los sistemas de envidriado estructural.

Siguiendo con la tendencia del diseño de envidriados con el criterio de la *hoja de sacrificio*, en 1997 Flocker y Dharani [47] presentan un código de propagación de ondas mediante elemento finito, para determinar los esfuerzos causados por el choque de dos cuerpos. Su aplicación a materiales quebradizos, como el vidrio, está limitada porque es difícil de modelar un comportamiento de fractura exacto. El código permite modelar la propagación de ondas generadas por el impacto de pequeños proyectiles a baja velocidad en vidrios laminados, como los que ocurren en tormentas o huracanes. Específicamente, este método está desarrollado para modelar fracturas que pueden generarse cuando el vidrio laminado es impactado por pequeños proyectiles.

Otra variante del trabajo anterior lo desarrollaron Ji *et al.* [48] en 1998, quienes investigaron la probabilidad de daño de un vidrio laminado al impacto. El impacto se efectuó en el vidrio que queda en la parte externa del edificio, con pequeños proyectiles a baja velocidad. Los resultados teóricos son muy similares a los obtenidos por experimentación. Encontraron que la probabilidad de daño en el sitio de impacto en el vidrio exterior depende fuertemente de la velocidad de impacto y en menor forma del espesor del vidrio. El espesor de la hoja de PVB tiene un efecto despreciable en el daño por compresión de la hoja exterior de vidrio.

Durante un accidente automovilístico, es muy común observar que la cabeza de los ocupantes se impacte contra el parabrisas o las ventanas laterales del vehículo. Para reducir los daños a la cabeza, es necesario investigar el comportamiento mecánico de un vidrio laminado al impacto. Ésta investigación fue reportada en 1998 por Dharani y Ji [49] quienes desarrollaron un método dinámico no lineal en elemento finito para

investigar el comportamiento antes descrito. Modelaron la cabeza humana como una esfera sólida de aluminio cubierta con un material visco-elástico simulando la piel. Encontraron que un parabrisas puede fallar en tiempos muy cortos (menos de 0.2 mseg) después del impacto, cuando las velocidades son tan grandes como 2.67 m/s (9.6 km/h).

Utilizando el criterio de diseño de la *hoja de sacrificio* Flocker y Dharani [50] analizaron el comportamiento al impacto de diferentes configuraciones de vidrios laminados de acuerdo a su geometría, utilizando algoritmos de elemento finito desarrollados con anterioridad. Utilizaron vidrios laminados multicapas con el mismo espesor nominal. La conclusión de su trabajo fue que los vidrios laminados de tres capas (vidrio / PVB / vidrio) ofrecen la mejor configuración para la resistencia al impacto. Con respecto a la geometría de los vidrios laminados de tres capas, un vidrio exterior delgado proporciona una mejor resistencia al impacto que uno grueso. Además, un vidrio exterior delgado produce esfuerzos cortantes menores en la interfase, conforme se aleja de la zona de impacto, por eso se reduce la posibilidad de daños a causa de la delaminación. Finalmente, otro beneficio de tener una hoja de vidrio exterior delgada, es consecuencia del concepto de diseño de la "hoja de sacrificio". Ya que solo se permite que el vidrio exterior se rompa, una porción gruesa del vidrio laminado en el interior permanece intacta para soportar las cargas de viento. Los esfuerzos superficiales en placas sujetas a presiones laterales son inversamente proporcionales al cubo del espesor, por lo que estos resultados representan una ventaja significativa en el diseño.

En 1998, Grant *et al.* [51] estudiaron el efecto de variar el espesor de los vidrios exterior e interior de un parabrisas automotriz, respecto a su resistencia al impacto. Trabajaron con diferentes espesores de vidrios exterior e interior, además de variar el ángulo de impacto sobre el vidrio laminado. Encontraron que el tipo de fractura resultante de cualquier impacto, depende fuertemente de parámetros tales como la velocidad de impacto, radio de curvatura del proyectil, ángulo de impacto y espesor del vidrio. Finalmente, las pruebas experimentales efectuadas a 45° del plano del vidrio, mostraron que es la componente normal de la velocidad la que determina el inicio del daño.

Con la intención de estandarizar las pruebas de impacto de pequeños proyectiles a baja velocidad que causan el rompimiento de envidriados arquitectónicos, en 1999 Bher *et al.* [52] desarrollaron la validación experimental de un modelo de elemento finito para vidrios laminados de arquitectura sujetos a impactos de proyectiles de dos gramos a baja velocidad. Se tomó como referencia el tamaño y peso de una piedra o gravilla utilizada en la impermeabilización de techumbres. Desarrollaron experimentos controlados utilizando una pistola de aire calibrada para disparar esferas de acero contra vidrios laminados rectangulares simplemente soportados. Las deformaciones dinámicas de las hojas de vidrio interior se midieron usando extensómetros y un sistema de adquisición de datos de alta velocidad. Variaron la velocidad de impacto, los espesores de las hojas de vidrio exterior e interior, el espesor del PVB y las condiciones de templado de los vidrios. En sus conclusiones proponen un criterio de diseño llamado “hoja de sacrificio”, el cual consiste en que la hoja exterior es la que debe romperse al impacto de los proyectiles contenidos en el viento, no así la hoja interior, la cual debe permanecer íntegra para resistir las cargas de viento durante una fuerte tormenta.

Por su parte, en el 2000 Kaiser [53] presentó resultados experimentales de pruebas de impacto con proyectiles pequeños a baja velocidad, simulando partículas contenidas en el viento. Utilizó diferentes espesores para las hojas interior y exterior del vidrio laminado, así como también el espesor de las hojas de PVB, para determinar el efecto de la resistencia al impacto de la hoja interior de vidrio, cuando el vidrio laminado se impacta en la hoja exterior. Los resultados mostraron que el espesor de la hoja interior de vidrio y el espesor del PVB tienen una fuerte influencia en la resistencia al impacto, más que la hoja exterior. Esta investigación ratifica el criterio de diseño de la *hoja de sacrificio*.

A la fecha, el criterio de diseño de *la hoja de sacrificio* solo se había utilizado para conocer los efectos del impacto de pequeños proyectiles, tales como pequeñas piedras que arrastra el viento durante una tormenta o huracán. Saxe *et al.* [54] presentaron un estudio para determinar el efecto de proyectiles de diferente masa (2, 8.4 y 28.8 g) impactándose con vidrios laminados de diferente configuración. Se utilizó vidrio

recocido, semi-templado y templado para la fabricación de los laminados. Los resultados obtenidos indicaron que el tamaño de la esfera y el nivel de tensión superficial del vidrio, tienen efectos significantes en la resistencia al impacto del vidrio interior de un vidrio laminado. En conclusión, determinaron que los vidrios laminados con mayor resistencia al impacto son los que están contruidos con vidrio recocido en el exterior y vidrio templado en el interior.

### ***Adhesión de vidrios laminados***

La adhesión entre las hojas de vidrio y el polímero de laminación PVB es un factor muy importante en el comportamiento mecánico de los vidrios laminados. Éstos se utilizan en los parabrisas de los automóviles en todo el mundo y su función es proteger a los ocupantes del automóvil de diferentes maneras. En estos vidrios, el enlace adhesivo entre el polímero y las hojas de vidrio mantiene al vidrio en su lugar cuando éste se rompe. La alta resistencia al impacto de los vidrios impide o reduce la penetración de objetos que puedan impactar el parabrisas.

La hoja elástica de PVB amortigua el impacto de los ocupantes en caso de un accidente, ayudando a reducir daños severos, y su resistencia ayuda a que los ocupantes del vehículo no sean expulsados a través del parabrisas durante un choque. Por tanto, la resistencia adhesiva de la hoja de PVB al vidrio es de crítica importancia para balancear los requerimientos de desempeño de los vidrios laminados de seguridad. Es deseable una buena adhesión para mantener el vidrio en su lugar, pero demasiada adhesión reduce la resistencia al impacto. Esto es porque la resistencia al impacto se logra a través del estiramiento y rompimiento de la hoja de PVB, lo cual no puede ocurrir si el PVB esta muy restringido a causa de su adhesión al vidrio. Para una alta resistencia al impacto se prefieren niveles bajos de adhesión, que permiten más deformación de la hoja de PVB. Por tanto, se requiere balancear con un nivel de adhesión media, el funcionamiento satisfactorio de la retención del vidrio y la resistencia al impacto. Por esta razón, el control y la caracterización de la adhesión en los vidrios laminados de seguridad son de importancia crítica.

En 1997, Sha *et al.* [55] desarrollaron una prueba de tensión para analizar la adhesión característica de vidrios laminados de arquitectura y automotrices. En la prueba de tensión se utilizó una placa rectangular de vidrio laminado, a la cual se le hicieron fracturas en la parte media en ambos lados. La muestra se colocó sobre dos apoyos simples y se aplicó una carga puntual al centro con un desplazamiento constante. La carga sobre el vidrio laminado genera un pico en las mediciones que representa la carga máxima aplicada  $P^*$ , y el valor de  $P^*$  depende de la adhesión entre el polímero de laminación y el vidrio. La carga máxima  $P^*$  se puede utilizar para caracterizar la resistencia de adhesión de la interfase, pero no proporciona un valor de adhesión independiente de la geometría de la muestra. La relación entre la carga pico y el mecanismo de delaminación se puede analizar usando un modelo de elemento finito. Las resistencias a la fractura estimadas para vidrios con alta, media y baja adhesión fueron 295, 154 y 104  $\text{Jm}^{-2}$  respectivamente.

Jagota *et al.* [56] reportan en el 2000, una prueba en donde se combinan esfuerzos cortantes y de compresión para caracterizar la adhesión de polímeros elastoméricos y sustratos rígidos. La prueba consiste en aplicar una carga de compresión a un vidrio laminado de tres capas; vidrio / PVB / vidrio. El sistema de sujeción del vidrio tiene un ángulo de inclinación de  $45^\circ$ , por tanto la carga normal aplicada se descompone en dos fuerzas, una de compresión y otra de corte. Bajo condiciones controladas de aplicación de la carga y cuando la adhesión es suficientemente baja, se inicia la nucleación de la fractura en la interfase del vidrio laminado. Ésta se propaga establemente hasta alcanzar valores críticos de carga, después de los cuales, se propaga inestablemente hasta que sucede una caída abrupta de carga. El análisis demostró que para un tamaño inicial de fractura, ésta se propaga de manera estable, hasta que su longitud alcanza una dimensión crítica, en la cual sucede una propagación inestable. Los valores obtenidos de resistencia a la adhesión estuvieron en el rango de 50 a 200  $\text{Jm}^{-2}$ .

En el 2000, Muralidhar *et al.* [57] presentaron un estudio teórico experimental del comportamiento mecánico a tensión de vidrios laminados con fracturas en ambos vidrios. Las fracturas realizadas a los vidrios se encuentran en su parte media, paralelas

al extremo menor. A este tipo de prueba la llamaron prueba de tensión por medio de fractura (TCT, Tensión Crack Test en inglés). La prueba involucra la delaminación estable de la interfase entre el polímero y el vidrio al aplicar una carga de tensión. La fuerza requerida para mantener la deformación en aumento, alcanza un valor de estado estable. Modelaron el polímero como un material isotérmico hiperelástico. Los resultados obtenidos en la extensión máxima alcanzada por la fractura, relacionan la fuerza en estado estable como una medida de la energía de fractura interfacial y las propiedades elásticas del material. Los resultados representan un modelo de fuerza – desplazamiento para vidrios laminados con fractura vidrio/PVB, los cuales se pueden usar para construir modelos de vidrios laminados de hojas múltiples.

También en el 2000, Seshadri *et al.* [58] presentan un estudio de la respuesta mecánica de vidrios laminados con fractura. Modelan la placa de vidrio con fractura como una colección de pequeños fragmentos rígidos conectados por medio de un material elastomérico. El comportamiento de la hoja elastomérica se representó por medio de un modelo de unión analítico, calibrado y validado mediante experimentación. El modelo presentado predice el comportamiento de un vidrio laminado con fractura, como función de la resistencia adhesiva, el espesor y propiedades elásticas de la hoja elastomérica y del número de fragmentos y tamaño del laminado.

Con base en la revisión bibliográfica presentada anteriormente, se tiene que actualmente no existe en el mercado nacional un vidrio laminado que reúna las características de control de la radiación solar y resistencia mecánica en conjunto. Por tal razón, en este trabajo de investigación se propone desarrollar vidrios laminados con películas semiconductoras espectralmente selectivas, que tengan características ópticas, térmicas y mecánicas aceptables para su aplicación en regiones geográficas de clima cálido propensas a fenómenos climatológicos como tormentas y huracanes.

### 1.3 Objetivo

El objetivo general del presente trabajo es el desarrollo de arreglos de vidrios laminados controladores de la radiación solar (*avilcrasol*) con buenas características ópticas, térmicas y mecánicas. Esto tiene como propósito desarrollar criterios de selección de los *avilcrasol* para aplicaciones arquitectónicas, de acuerdo a su ubicación geográfica, así como también para aplicaciones automotrices. Asimismo, los objetivos específicos que contribuyen a cumplir el objetivo general son los siguientes:

- (i) Depósito químico de películas delgadas de CuS, y CuS-Cu<sub>2-x</sub>Se sobre vidrio y PET para fabricación de diferentes configuraciones de *avilcrasol*.
- (ii) Caracterización óptica, térmica y mecánica de los *avilcrasol*, con el propósito de evaluar sus posibles aplicaciones.
- (iii) Proponer criterios para la selección de los *avilcrasol* apropiados, según sea la ubicación geográfica de aplicación.

A continuación se presenta la descripción capitular de este trabajo de tesis.

El **Capítulo 1** presenta los antecedentes, la revisión bibliográfica y el objetivo de este trabajo de investigación. En el **Capítulo 2** se presentan los detalles de la experimentación realizada en este trabajo de tesis, desde el depósito de películas delgadas hasta la caracterización óptica, térmica y mecánica de los vidrios laminados.

En el **Capítulo 3** se presentan los resultados obtenidos de la caracterización óptica y mecánica de los vidrios laminados con películas delgadas de ZnS, CuS, ZnS-CuS, y ZnS-CuS-Cu<sub>2-x</sub>Se depositadas sobre vidrio. En el **Capítulo 4** se presenta la caracterización óptica y mecánica de los vidrios laminados con películas delgadas de CuS y CuS-Cu<sub>2-x</sub>Se sobre hojas de PET.

En el **Capítulo 5** se presenta el balance térmico de los vidrios laminados de acuerdo a la configuración de estos. Con base en las características ópticas, térmicas y

mecánicas se proponen criterios de selección de vidrios laminados de acuerdo a la región geográfica de ubicación de la edificación o automóvil, así como de la orientación de los mismos. Finalmente en el **Capítulo 6** se presentan las conclusiones generales de este trabajo de tesis, así como el trabajo futuro que se propone con base en los resultados obtenidos. Esto con la finalidad de tener un mejor entendimiento del comportamiento óptico, térmico y mecánico de los vidrios laminados con películas espectralmente selectivas para el control de la radiación solar.

El trabajo presentado en esta tesis se desarrolló con base en los conceptos recopilados y presentados en el Apéndice A. En este se presentan los aspectos generales sobre los *avilcrasol*, desde la descripción de *vidrio laminado* y todos los factores que involucran su fabricación y caracterización, hasta los tipos que existen y sus características. También se presentan los conceptos básicos sobre depósito químico de películas delgadas semiconductoras, la interacción electromagnética en éstas, sus propiedades ópticas, térmicas y mecánicas, etc.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] [www.energia.gob.mx/distribuidor.jsp?seccion=154](http://www.energia.gob.mx/distribuidor.jsp?seccion=154)
- [2] Villareal A, López M I y Villareal T, **Manual Técnico, Vitro Vidrio Plano**, 1990.
- [3] Wegner E J, **Large volume coated glass production for architectural markets in North America**, *J. Non-Cryst Solids* 218 (1997)7.
- [4] Ebisawa J and Ando E, **Solar control coating on glass**, *Current Opinion in Solid State & Materials Science*, 3 (1998)386.
- [5] Nair P K, Nair M T S, Fernandez A and Ocampo M, **Prospects of chemically deposited metal chalcogenide thin films for solar control applications**, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 22 (1989)829.
- [6] Nair M T S and Nair P K, **Chemical bath deposition of  $Cu_xS$  thin films and their prospective large area applications**, *Semicond. Sci. Technol.* 4 (1989)191.

- 
- [7] Nair P K and Nair M T S, **Versatile solar control characteristics of chemically deposited PbS-Cu<sub>x</sub>S thin films combinations**, *Semicond. Sci. Technol.* **4** (1989)807.
- [8] Nair M T S and Nair P K, **Near-ideal solar control characteristics of Cu<sub>x</sub>S thin films**, *Semicond. Sci. Technol.* **4** (1989)599.
- [9] Garcia V M, Nair M T S and Nair P K, **Optical properties of PbS-Cu<sub>x</sub>S and Bi<sub>5</sub>S<sub>3</sub>-Cu<sub>x</sub>S thin films with reference to solar control and solar absorber applications**, *Solar Energy Materials* **23** (1991)47.
- [10] Nair P K, Garcia V M, Fernandez A M, Ruiz H S and Nair M T S, **Optimization of chemically deposited Cu<sub>x</sub>S solar control coatings**, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **24** (1991)441.
- [11] Nair M T S and Nair P K, **SnS-Cu<sub>x</sub>S thin film combination: a desirable solar control coating for architectural and automobile glazing**, *J. Phys. D: Appl. Phys* **24** (1991)450.
- [12] Fernandez A and Nair P K; **Characteristics of metal chalcogenide solar control films with a protective polymer coating**, *Thin Solid Films*, **204** (1991)459.
- [13] Huang L, Nair P K, Nair M T S, Zingaro R A and Meyers E, **Interfacial diffusion of metal atoms during air annealing of chemically deposited ZnS-CuS and PbS-CuS thin films**, *J. Electrochem. Soc.* **141**(1994)2536.
- [14] Arenas, O L, Nair M T S and Nair P K, **Chemical bath deposition of ZnS thin films and modifications by air annealing**, *Semicond. Sci. Technol.* **12** (1997)1323.
- [15] Huang L, Zingaro R A, Meyers E A, Nair P K and Nair M T S, **Chemical deposition of thin films of copper sulfide on glass surfaces modified with organosilanes**, *Phosphorus, Sulfur and Silicon*, **105** (1995)175.
- [16] Nair P K, Nair M T S, Gómez-Daza O, García V M, Castillo A, Arenas O L, Peña Y, and Guerrero L, **Laminated solar control safety glass incorporating chemically deposited metal chalcogenide thin films**, *The International Society for optical Engineering, Bellingham, Proc. SP1E* (1997)186.
-

- [17] Cuevas O, Tamariz J, Gomez-Daza O, Campos J, Nair M T S and Nair P K, **Control de la radiación solar mediante películas delgadas de CuS, depositadas químicamente**, Memorias 22 Semana Nacional de Energía Solar, ANES, (1998)268.
- [18] Correa M G, **Fabricación de filtros solares para ahorro de energía con recubrimientos de  $\text{Cu}_2\text{O-CuS}$  y  $\text{VO}_2$** , Tesis de Doctorado, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México (2002)17.
- [19] Nebojsa I J and Cem S, **A feasibility study of electrochromic windows in vehicles**, *Solar Energy Materials & Solar Cells*, **79** (2003)409.
- [20] Estrada G C, Alvarez G G and Nair P K, **Thermal performance of an architectural window with chemically deposited  $\text{SnS-Cu}_x\text{S}$  solar control coating**, *Renewable Energy*, **3** (1993)683.
- [21] Estrada G C A, Alvarez G G and Nair P K, **Theoretical analysis of the thermal performance of chemically deposited solar control coatings**, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **26** (1993)1304.
- [22] Alvarez G G, Jimenez D N, Estrada G C A and Nair P K, **Comparación teórico-experimental de la transferencia de calor en estado transitorio de un vidrio con controlador óptico**, XVIII Reunión Nacional de Energía Solar, Memorias (1994)267.
- [23] Alvarez G G y Estrada G C A, **Estudio teórico de la transferencia de calor en una cavidad cuadrada con ventana con controlador óptico**, XVIII Reunión Nacional de Energía Solar, memorias, (1994)276.
- [24] Flores J, Alvarez G G, and Nair P K, **Determinación de coeficientes de sombreado de vidrios laminados con dos filtros solares**, XXII Semana Nacional de Energía Solar, memorias (1998)280.
- [25] Alvarez G G, Flores J J and Estrada C A, **The termal response of laminated glass with solar control coating**, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **31**(1998)3057.
- [26] Alvarez G G, Palacios M J and Flores J J, **A test method to evaluate the thermal performance of window glazings**, *Appl. Thermal Engineering* **20**(2000)803.

- 
- [27] Alvarez G G, Flores J J and Nair P K, **Influence of thermal emittance on the performance of laminated solar control glazing**, *Appl. Thermal Engineering* **21**(2001)1813.
- [28] G Alvarez, J J Flores, J O Aguilar, O Gomez-Daza, C.A. Estrada, M T S Fair and P. K. Nair, **Spectrally selective laminated glazing consisting of solar control and heat mirror coated glass: preparation, characterization and modelling of heat transfer**, *Solar Energy*, **78**(2005)113.
- [29] Minor J E and Beason W L, **Window Glass Failures in Windstorms**, *J. Structural Division* **102**, No.ST1 (1976)147.
- [30] Minor J E, and Mehta K C, **Window Glass Design Practice: A Review**, *J. Structural Division* **105** No.ST1 (1981)1.
- [31] Vallabhan C V G, **Iterative Análisis of Nonlinear Glass Plates**, *J. Structural Engineering* **2**(1983).
- [32] Beason W L and Morgan J R, **Glass Failure Prediction Model**, *J. Structural Division* **110** No.2 (1984)197.
- [33] Beason W L, Meyers G E and James R W, **Hurricane Related Window Glass Damage in Houston**, *J. Structural Engineering* **110**, No. 12 (1984) 2843.
- [34] Behr R A, Minor J E, Linden M I and Vallabhan C V G, **Laminated Glass Units Under Uniform Lateral Pressure**, *Journal Structural Engineering*, **111**, No.5 (1985)1037.
- [35] Norville M S and Minor J, **Strength of Weathered Window Glass**, *Am. Ceram. Bull.* **64** [11] (1985)1467.
- [36] Vallabhan C V G, Wang B Y, Chou G D and Minor J E, **Thin Glass Plates on Elastic Supports**, *J. Structural Engineering*, **111**, No.11 (1985)2416.
- [37] Beason W L, **Structural Analysis of Sealed Insulating Glass**, *J. Structural Engineering*, **112**, No. 5 (1986)1133.
- [38] Minor J E and Reznik P L, **Failure Strengths of Laminated Glass**, *J. Structural Engineering*, **116**, No. 4 (1990)1030.
- [39] Vallabhan C V G, Chou G D and Minor J E, **Seal Forces in Structural Glazing Systems**, *J. Structural Engineering*, **116**, No. 4 (1990) 1080.

- [40] Pantelides C P, Horst A D and Minor J E, **Postbreakage Behavior of Heat Strengthened Laminated Glass Under Wind Effects**, *J. Structural Engineering*, **119**, No. 2 (1993) 454.
- [41] Norville H S, Bove P M, Sheridan D L and Lawrence S L, **Strength of New Heat Treated Window Glass Lites and Laminated Glass Units**, *J. Structural Engineering*, **119**, No. 3 (1993)891.
- [42] Beason W L, **Strength of New Heat Treated Window Glass Lites and Laminated Glass Units**, *J. Structural Engineering*, **120**, No. 10 (1994)3075.
- [43] Vallabhan C V G, Das Y C, Magdi M, Asik M and Bailey J R, **Analysis of Laminated Glass Units**, *J. Structural Engineering*, **119**, No. 5 (1993) 1573.
- [44] Bher R A, Minor J E and Norville H S, **Structural Behaviour of Architectural Laminated Glass**, *J. Structural Engineering*, **119**, No. 1 (1993)202.
- [45] Bher R A and Kremer P A, **Performance of Laminated Glass Units Under Simulated Windborne Debris Impacts**, *J. Architectural Engineering*, **2**, No. 3 (1996)95.
- [46] Vallabhan C V G, **Analysis of Structural Glazing Systems**, *Computers & Structures*, **65**, No. 2 (1997)231.
- [47] Flocker F W and Dharani L R, **Modelling Fracture in Laminated Architectural Glass Subject to Low Velocity Impact**, *J. Materials Science*, **32** (1997) 2587.
- [48] Ji F S, Dharani L R and Bher R A, **Damage Probability in Laminated Glass Subjected to Low Velocity Small Missile Impacts**, *J. Materials Science*, **33** (1998)4775.
- [49] Dharani L R and Ji F S, **Dynamic Analysis of Normal Impact of Occupant Head on Laminated Glass**, SAE Technical Papers No. 980862. International Congress and Exposition, Detroit Michigan, 1998.
- [50] Flocker F W and Dharani L R, **Low Velocity Impact Resistance of Laminated Architectural Glass**, *J. Architectural Engineering*, **4**, No. 1 (1998)12.
- [51] Grant P V, Cantwell W J, McKenzie H and Corkhill P, **The damage Threshold of Laminated Glass Structures**, *Int. J. Impact, Engng.*, **21**, No. 9 (1998)737.

- [52] Bher R A, Kremer P A, Dharani L R, Ji F S and Kaiser N D, **Dynamic Strains in Architectural Laminated Glass Subjected to Low Velocity Impacts from Small Projectiles**, *J. Mat. Sci.*, **34** (1999)5749.
- [53] Kaiser N D, Bher R A, Minor J E, Dharani L R, and Kremer P A, **Impact Resistance of Laminated Glass Using Sacrificial Ply Design Concept**, *J. Architectural Engineering*, **6**, No. 1 (2000)24.
- [54] Saxe T J, Bher R A, Minor J E, Kremer P A and Dharani L R, **Effects of Missile Size and Glass Type on Impact Resistance of Sacrificial Ply Laminated Glass**, *J. Architectural Engineering*, **8**, No.1 (2002)24.
- [55] Sha Y, Hui C Y, Kramer E J, Garret P D and Knapczyk J W, **Analysis of Adhesion and Interface Debonding in Laminated Safety Glass**, *J. Adhesion Sci. Technol.*, **11**, No.1 (1997)49.
- [56] Jagota A, Bennison S J and Smith C A, **Analysis of a Compressive Test for Adhesion Between Elastomeric Polymers and Rigid Substrates**, *Int. J. Fracture*, **104**, (2000)105.
- [57] Muralihdar S, Jagota A, Bennison S J and Saigal S, **Mechanical Behaviour in Tension of Cracked Glass Bridged by an Elastomeric Ligament**, *Acta Materialia*, **48** (2000)4577.
- [58] Seshadri M, Bennison S J, Jagota A and Saigal S, **Mechanical Response of Cracked Laminated Plates**, *Acta Materialia*, **50** (2002)4477.

# **CAPÍTULO 2**

## **DESARROLLO EXPERIMENTAL**

En este capítulo se presenta la descripción del trabajo experimental que se llevó a cabo en este proyecto de investigación, como es el depósito químico y caracterización de películas delgadas semiconductoras (PDS), el proceso de pre-laminación y laminación de vidrios, la caracterización óptica y las pruebas de adhesión a los mismos.

### **2.1 Depósito Químico y Tratamientos Superficiales**

Para la fabricación de vidrios laminados con PDS para el control de la radiación solar, se utilizaron diferentes sustratos, como son vidrio, tereftalato de polietileno (PET), poli metil metacrilato (PMMA) y policarbonato (PC). Cada sustrato en especial presenta características mecánicas diferentes, y el crecimiento de las películas sobre ellos también es diferente. Con esto se espera obtener una gran variedad de vidrios laminados, con igual variedad de propiedades ópticas y mecánicas. El PMMA y el PC presentan características mecánicas superiores al PET y vidrio, sin embargo, después de varios intentos sin éxito por fabricar un vidrio laminado con buenas características ópticas de éstos, se descartó su desarrollo en este trabajo. Las PDS se depositan muy

bien sobre el PMMA y el PC, pero durante el proceso de laminación presentan problemas de delaminación (PMMA) y opacidad con muy buena adherencia (PC). Esto dejó solo las opciones de depositar las PDS sobre sustratos de vidrio y PET.

Se utilizó la técnica de Depósito por Baño Químico (*CBD, Chemical Bath Deposition*) descrita en el apéndice A, para depositar PDS de sulfuro de cobre (CuS) y  $\text{CuS-Cu}_{2-x}\text{Se}$  (seleniuro de cobre) sobre terfetalato de polietileno (PET), y sulfuro de zinc (ZnS),  $\text{ZnS-CuS}$ ,  $\text{ZnS-CuS-Cu}_{2-x}\text{Se}$ , CuS y  $\text{CuS-Cu}_{2-x}\text{Se}$ , para integrarlas a un vidrio laminado. Para obtener un mejor crecimiento de las PDS sobre los sustratos, se utilizaron diversos tratamientos superficiales para lograrlo. Un aumento en la adhesión de las PDS trae consigo la posibilidad de alcanzar mayores espesores de película y por tanto más variedades en características ópticas.

Para el mejoramiento de la adhesión de las PDS al vidrio se utilizó ZnS como sustrato, ya que ha demostrado ser un buen promotor de adhesión [1,2 y 3], y para promover la adhesión de las PDS al PET se utilizaron tratamientos superficiales con soluciones ácidas y básicas y organosilanos (OS). Los OS resultaron ser buenos promotores de adhesión [4] de las PDS sobre vidrio y el beneficio que esto trajo es el uso de baños químicos libres de amoniaco. López Mata [5] reportó la modificación superficial del PET con OS para el mejoramiento de la adhesión de PDS sobre vidrio y PET. Las PDS depositadas sobre PET tratado superficialmente con OS, mostraron una adherencia superior a las depositadas sobre PET sin tratamiento. Esto se observó al frotar fuertemente con los dedos los sustratos de PET con y sin OS. Las hojas de PET tratadas con OS mostraron una mejor adhesión, ya que la película delgada no se desprendió con la fricción de los dedos, lo cual sí ocurrió con las hojas de PET sin tratamiento superficial.

### **2.1.1 Tratamientos Superficiales con Soluciones Ácidas y Básicas.**

Los sustratos fueron tratados en las diferentes soluciones presentadas en la Tabla 2.1, con el propósito de mejorar la adherencia de las PDS a estos. Los tratamientos consistieron en dejar inmersas los sustratos (hojas de PET) en las soluciones

mostradas en la Tabla 2.1 en orden descendente y durante los tiempos indicados. Por ejemplo, para el tratamiento 1, se dejaron inmersas las hojas de PET en una solución de Ajax<sup>®</sup> (amoniaco grado comercial al 10%) durante 15 minutos. La temperatura de esta solución fue de 58°C a 60°C. Transcurridos los 15 minutos los sustratos se retiraron de la solución de Ajax<sup>®</sup> y se enjuagaron con agua destilada, para posteriormente sumergirlos en la solución de ácido fosfórico (H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>) al 1% durante otros 15 minutos.

**Tabla 2.1** Tratamientos superficiales con soluciones ácidas y básicas

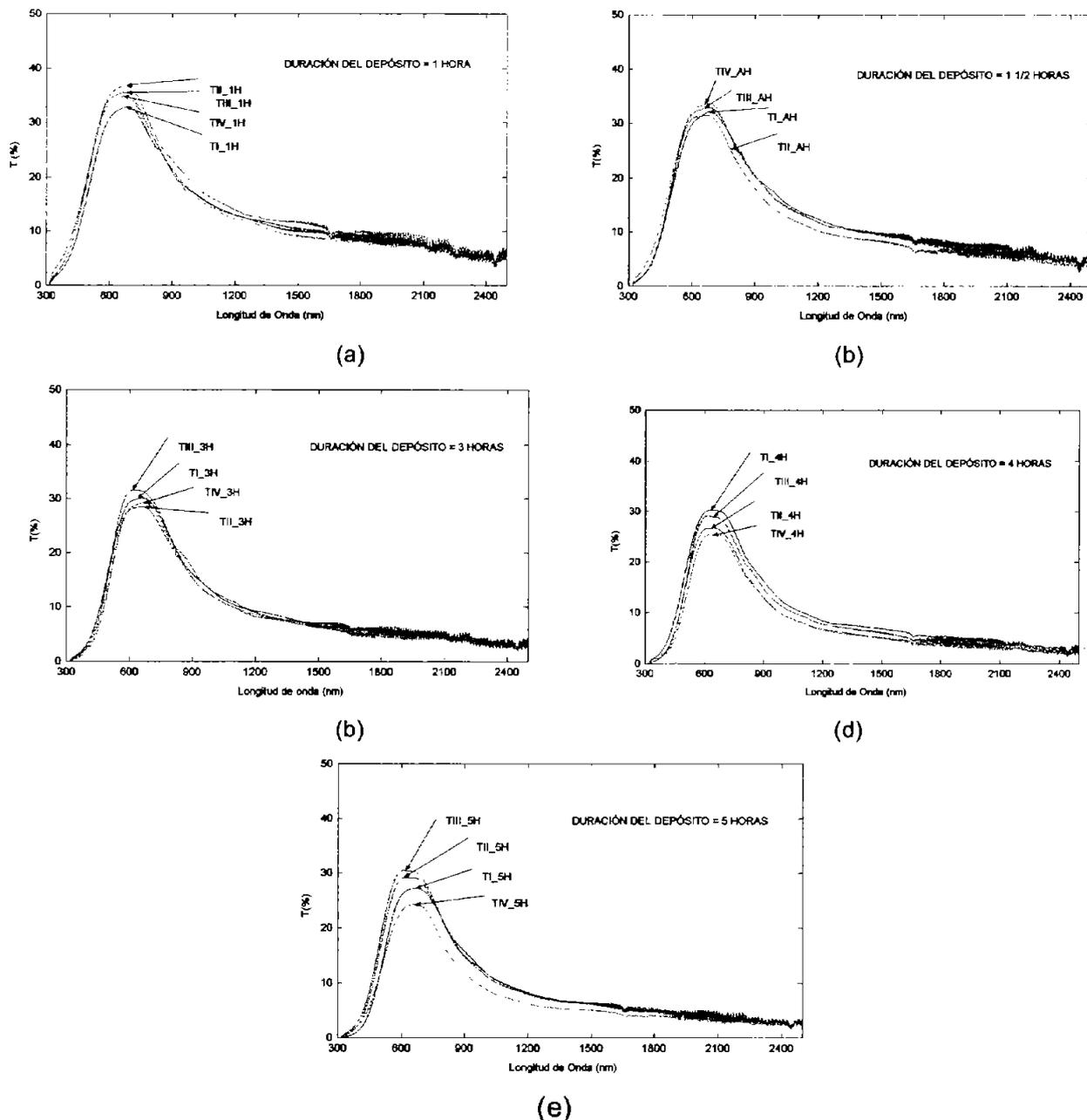
Tratamientos	1	2*	3	4
AJAX <sup>®</sup> (al 10%)	15 min	15 min	15 min	15 min
H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> al 1% (ac. Fosfórico)	15 min	15 min	--	--
NaOH (sosa)	5 min	5 min	15 min	--
CH <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> COOH (ác. Propiónico)	10 min	10 min	--	--
SnCl <sub>2</sub>	--	--	--	15 min

\*En esta formulación el H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> es al 5%; el AJAX<sup>®</sup> es un producto comercial que contiene Hidróxido de Sodio, Hidróxido de amonio y Carbonato de Sodio como componentes principales.

Los sustratos nuevamente se retiraron de la solución anterior y se enjuagaron con agua destilada, e inmediatamente fueron inmersos en la siguiente solución que es la sosa (NaOH) durante 5 minutos, y finalmente, después de enjuagarlos nuevamente con agua destilada, fueron inmersos en la solución de ácido propiónico (CH<sub>3</sub>CH<sub>2</sub>COOH) por 10 minutos. Los siguientes tratamientos se realizaron de manera análoga. Después de la inmersión en la última solución de cada tratamiento, los sustratos fueron retirados y secados con aire tibio, quedando listos para depositar en ellos las películas semiconductoras de CuS, Cu<sub>2-x</sub>Se y CuS- Cu<sub>2-x</sub>Se.

En el tratamiento 3 sólo se utilizó Ajax<sup>®</sup> y sosa, y en el 4 Ajax<sup>®</sup> y la solución de SnCl<sub>2</sub> con una concentración de 0.001 mol/dm<sup>3</sup>. Los gráficos de las películas de CuS depositadas sobre PET durante tiempos de 1 a 5 h, con los tratamientos superficiales 1 al 4 se muestran en la Figura 2.1. Estos parámetros ópticos corresponden a hojas de PET depositadas con CuS integradas en un vidrio laminado compuesto por dos hojas

de vidrio claro de 3 mm de espesor, dos hojas de PVB de 0.76 mm de espesor y en la parte media, la hoja de PET con depósito de CuS. Los gráficos anteriores muestran una diferencia en el crecimiento de las películas delgadas de CuS que se manifiesta por una variación del 5% aproximadamente en los valores máximos de transmitancia; esto es, en una longitud de onda cercana a los 560 nm (verde-amarillo).



**Figura 2.1** Comparación de las películas de CuS sobre PET integradas a vidrios laminados con diferentes tratamientos superficiales y a diferentes duraciones de depósito: (a) 1 h, (b) 1.5 h, (c) 3h, (d) 4h y (e) 5h.

Durante el tiempo en que se trabajó con los tratamientos superficiales descritos anteriormente, la consideración principal fue lograr un mejor crecimiento de las películas delgadas de CuS sin desprendimiento de éstas de las hojas de PET, ya que se ha observado que con tiempos de depósito mayores a 5h se desprenden dichas películas. Cuando se realizó la experimentación descrita anteriormente, no se consideraba aún la caracterización de la resistencia adhesiva de las películas delgadas integradas en los vidrios laminados mediante la prueba de corte compresivo. Es posible que se encuentren diferencias significativas en los valores de resistencia adhesiva entre los 4 tratamientos superficiales en trabajos futuros.

### 2.1.2 Tratamiento Superficial al PET con Organosilanos.

López Mata [5] observó que con un tratamiento superficial al PET con organosilanos [ $C_6H_5NH(CH_2)_3 Si(OCH_3)_3$  (*N*-[3-(Trimetoxisilil)-propil]anilina) de Aldrich®], se mejora la adhesión de las películas delgadas semiconductoras depositadas sobre éste. Esto dio la pauta para iniciar la experimentación que permitiría cuantificar la resistencia adhesiva de las películas delgadas de CuS y CuS-Cu<sub>2-x</sub>Se depositadas sobre PET, cuyos resultados se presentan en el Capítulo 4.

Los tratamientos superficiales consistieron en dejar inmersas las hojas de PET en una solución del organosilano con metanol durante 30 minutos a 50°C. Con este tratamiento se mejoró la adhesión de las PDS sobre el PET, ya que se lograron depositar PDS con duraciones de hasta 24 h sin desprendimiento [5]. Las películas de CuS obtenidas sobre PET se laminaron utilizando PVB como polímero de laminación. Se construyeron diversos *avilcrasol* para llevar a cabo las pruebas de adhesión. Los parámetros de laminación y pre-laminación de los *avilcrasol* se describen con detalle más adelante en éste capítulo. Los tipos de *avilcrasol* construidos fueron cinco y son: Vidrio (V) / PVB / V; V / PVB / PET / PVB / V; V / PVB / PETct / PVB / V; V / PVB / PET / CuS / PVB / V; V / PVB / PETct / CuS / PVB / V; V / PVB / PET / CuS + Cu<sub>2-x</sub>Se / PVB / V y V / PVB / PETct / CuS + Cu<sub>2-x</sub>Se / PVB / V. Las siglas PETct significan PET con tratamiento superficial con organosilanos (OS de aquí en adelante). Las películas de CuS y Cu<sub>2-x</sub>Se tuvieron una duración de depósito de 120 y 5 minutos respectivamente. El intervalo de

temperatura bajo la cual se depositaron fue de 25° C a 28° C, con un espesor total de 100 nm aproximadamente. En el Capítulo 4 se muestran con más detalle los resultados obtenidos de esta experimentación.

### 2.1.3 Tratamiento Superficial con Películas Delgadas de Sulfuro de Zinc (ZnS).

En el depósito químico de PDS es muy importante la limpieza del sustrato, en este caso vidrio, para poder obtener un crecimiento uniforme. Las películas de CuS requieren una limpieza rigurosa del sustrato [6] para un crecimiento con uniformidad aceptable. Se ha observado en trabajos del grupo [2,3] que depositar una película delgada de ZnS sobre vidrio, como sustrato, incrementa el crecimiento de las películas semiconductoras depositadas posteriormente. Se evita además, la limpieza rigurosa de los vidrios porque las películas de ZnS crecen sin requerir tal grado de limpieza. Por tanto, para reducir el tiempo de crecimiento de las películas delgadas de CuS, se propuso utilizar películas de ZnS como promotoras de adhesión. En el apartado 3.4.1 se muestra que las películas de ZnS no modifican las propiedades ópticas de los *avilcrasol*, ya que tienen casi las mismas características ópticas de un vidrio claro (cal-sosa) de 3 mm. La Tabla 2.2 muestra la composición del baño químico para depositar películas delgadas de ZnS.

**Tabla 2.2** Composición del baño químico para depositar películas delgadas de ZnS

Soluciones	Cantidad (ml)
Sulfato de Zinc (ZnSO <sub>4</sub> ) 1M	2.5
pH 10 (NH <sub>3</sub> /NH <sub>4</sub> Cl)	2.2
Trietanolamina al 50% (TEA)	2.7
Tioacetamida (TA) 1M	1
Agua Destilada	92.6
<b>Total</b>	<b>100</b>

La preparación de los vidrios por depositar consistió en un lavado ligero con agua y jabón, enjuague con agua destilada y secado con aire caliente. Una vez obtenida la solución para el depósito de ZnS siguiendo el orden mostrado en la Tabla 2.2, se vertió en un recipiente rectangular con un área aproximada de 40 cm x 90 cm. Dentro del recipiente se colocaron los vidrios por depositar (10 cm x 12.5 cm), soportados por

placas delgadas de vidrio; en la Figura 2.2 se muestra el recipiente para el depósito químico. La experiencia en el depósito de películas de ZnS ha demostrado que una duración de depósito de 6 horas da buenos resultados para el mejoramiento de la adhesión, por lo que se optó por utilizar esta.

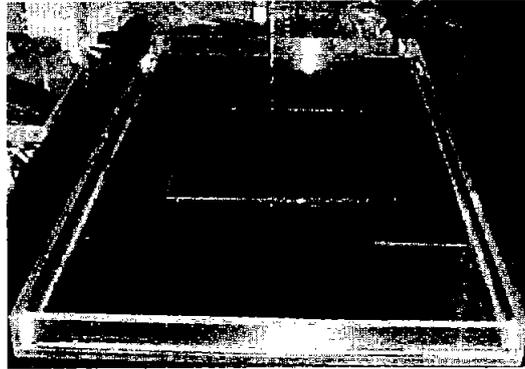


Figura 2.2 Recipiente para el depósito de PDS por CBD.

El depósito químico se realizó a temperatura ambiente (25°C). Una vez transcurrido el tiempo de depósito, se retiraron los vidrios y se enjuagaron y secaron, quedando listos para ser utilizados como sustrato para las películas de CuS y para la preparación de los vidrios laminados en la configuración vidrio-ZnS/PVB/ZnS-vidrio.

#### 2.1.4 Selección de la Superficie de Vidrio a Utilizar para el Depósito de PDS

Durante el proceso de fabricación del vidrio flotado, una de las caras del vidrio queda en contacto con el estaño líquido y la otra con el aire, y ésta última tiene mayor rugosidad. Esto se puede observar al comparar las figuras 2.3 (a) y (b), en donde se muestran la morfología superficial de un vidrio flotado en el lado aire (a) y lado estaño (b), obtenidas por la técnica de microscopía por fuerza atómica (AFM, *en inglés*). El tamaño de los granos permite inferir que el *lado estaño* tiene una rugosidad menor que el *lado aire*. Los fabricantes de vidrios laminados recomiendan usar siempre el lado aire en contacto con el PVB para mejorar la adhesión [7].

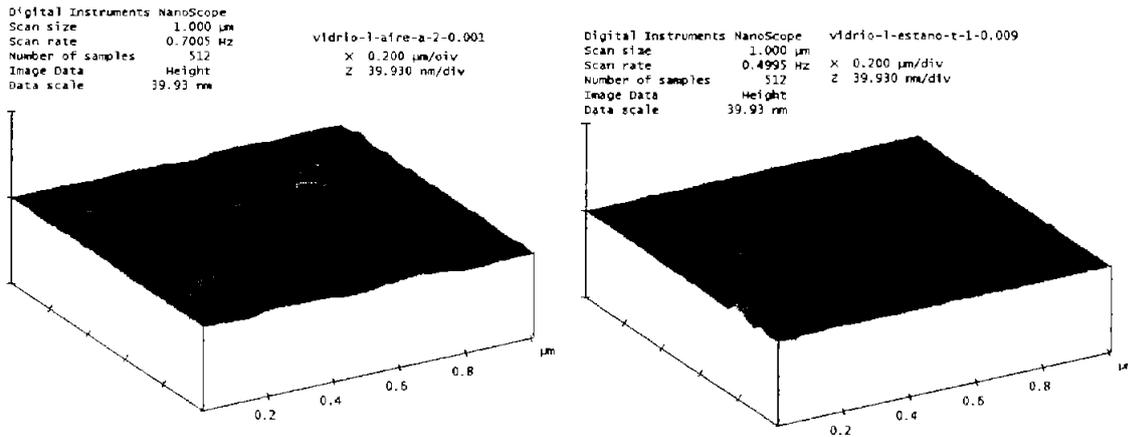
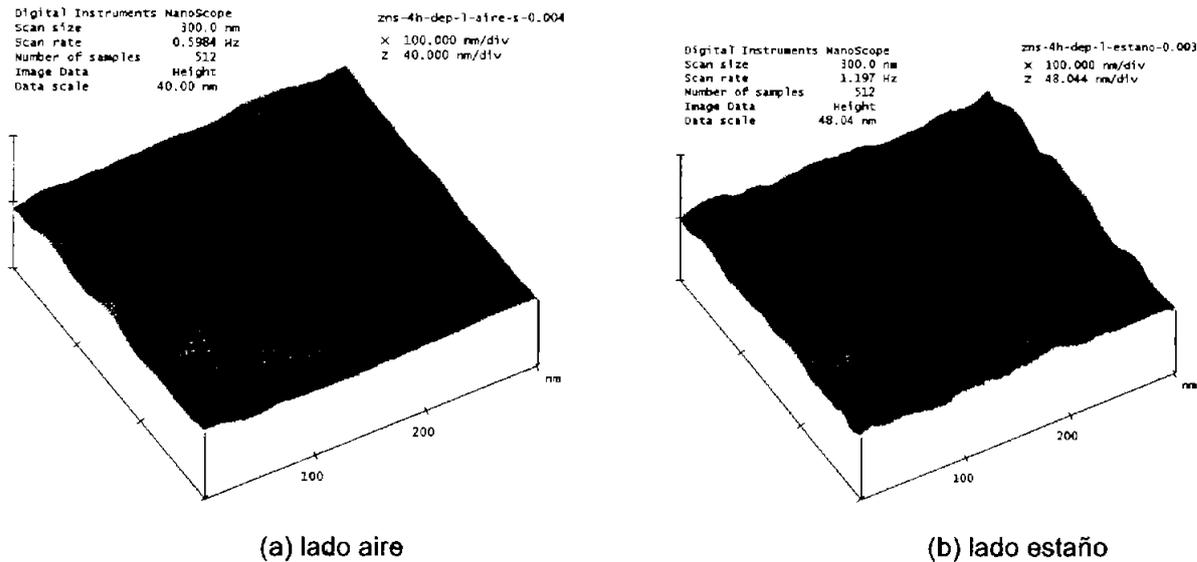


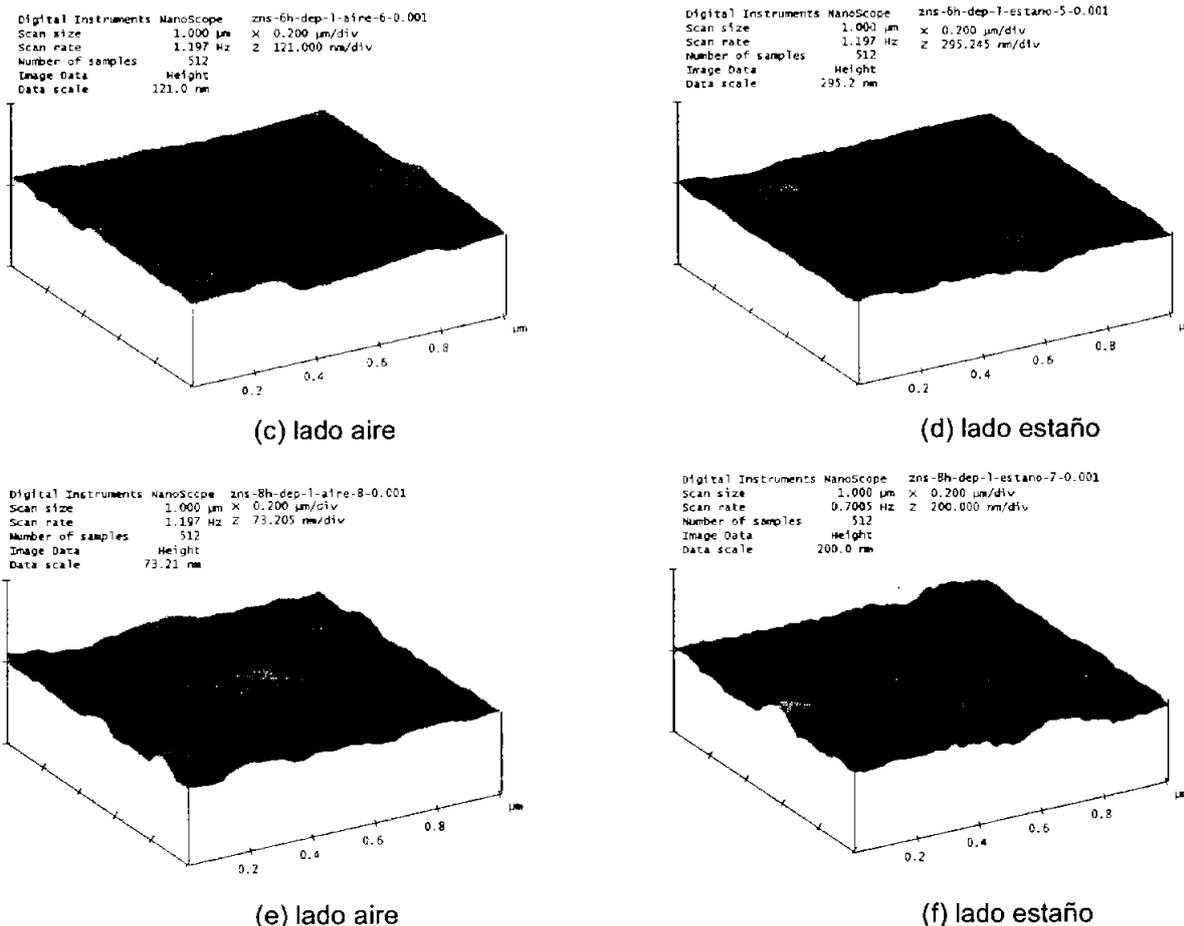
Figura 2.3 Morfología superficial mediante AFM de sustratos de (a) vidrio lado aire y (b) vidrio lado estaño.

Se realizaron análisis similares para conocer la modificación superficial que ocurre sobre el vidrio al ser depositada la película de ZnS durante 4, 6 y 8 horas. La Figura 2.4 muestra la morfología superficial de vidrios con ZnS depositados en el lado aire y el lado estaño por 4 h (a y b), 6 h (c y d) y 8h (e y f) respectivamente. En éstas figura se observa que el lado aire (a, c y e) permanece siempre más rugoso (ver escala en z) que el lado estaño (b, d y f), aún con la película de ZnS depositada a 4 y 6 h, pero a 8 h, la diferencia morfológica es menos perceptible.



(a) lado aire

(b) lado estaño



**Figura 2.4** Morfología superficial mediante AFM de vidrios depositados sobre lado aire y estaño con ZnS por 4h (a y b), 6h (c y d) y 8h (e y f) respectivamente.

Para corroborar que la rugosidad beneficia la adhesión interfacial en los vidrios laminados, se desarrollaron pruebas experimentales para determinar la resistencia adhesiva de vidrios laminados que incorporan ZnS y los resultados se presentan en el Capítulo 3.

### 2.1.5 Depósito Químico de Películas Delgadas de CuS

Los PDS para el control de la radiación solar se producen sobre hojas de PET y vidrio mediante la técnica de CBD descrita en el Capítulo 1. Se utilizaron dos soluciones diferentes para obtener películas de CuS, una de ellas se utiliza para depositar sobre PET y se le llama “baño químico citrato”, y la solución para depositar sobre vidrio se le llama “baño químico amoníaco”. Con el baño citrato no es posible crecer películas de CuS con espesores mayores a 40 nm sobre vidrio ya que se desprenden. La diferencia

entre estas soluciones es el agente complejante que libera los iones de cobre y azufre que se depositarán sobre la superficie del PET y vidrio, de allí el nombre de cada uno de ellos. A continuación se describe cada baño. El espesor todas las PDS depositadas sobre vidrio se midió con un perfilómetro Alpha-Step (Tencor Instruments, CA).

**Baño químico “citrato”**

Este baño se utiliza para depositar CuS sobre PET, y contiene iones cobre (2) y una fuente de iones de sulfuro (Tioacetamida). La duración de los depósitos es de 1 a 5 horas, con una temperatura inicial de la solución de 40-45°C y se enfría a temperatura ambiente durante el depósito. Las dimensiones del PET utilizado como sustrato, fueron de 5 x 10 cm y se colocaron “flotando” sobre la solución en una charola de 60 cm x 90 cm. El depósito de la película de CuS se llevó a cabo de manera similar a como se describe en el apartado 2.1.3. El depósito se realizó en dos etapas para tener películas (40 – 100 nm espesor) en ambos lados del PET. Al final del depósito de las películas de CuS sobre las hojas de PET, éstas se enjuagaron con agua destilada y se secaron con aire tibio. La Tabla 2.3 presenta el baño químico “citrato” utilizado para la obtención de las PDS de CuS sobre PET de 0.1 mm de espesor.

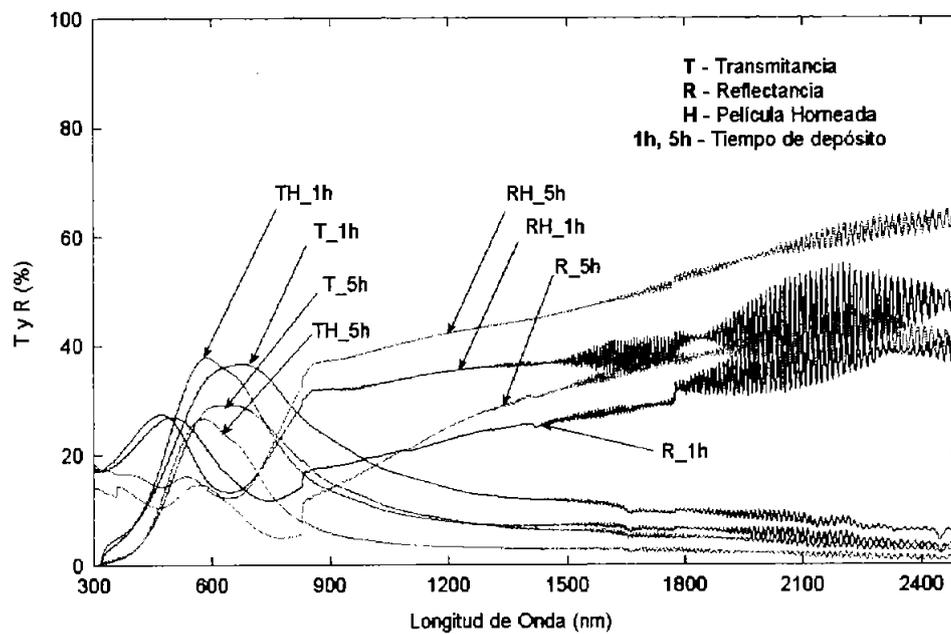
**Tabla 2.3** Composición del baño químico “citrato” para obtener las películas delgadas de CuS.

Soluciones	Volumen (ml)
Cloruro de Cobre 1M (CuCl <sub>2</sub> )	10
Citrato de Sodio 1M (C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> O <sub>7</sub> Na <sub>3</sub> )	45
Tioacetamida 1M (TA)	10
Agua destilada (50° C)	935
<b>Total</b>	<b>1000</b>

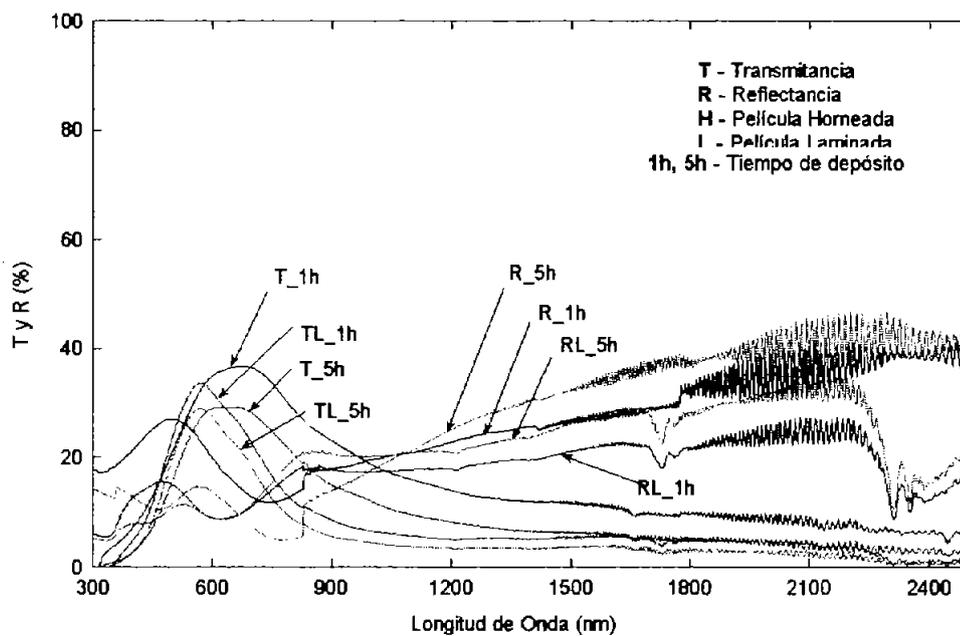
Para determinar la influencia que tiene el horneado de las PDS en las propiedades ópticas de transmitancia óptica y reflectancia especular, se tomaron tres lotes de muestras para analizarlas ópticamente, un lote se analizó después del depósito, otro se horneó a 150°C sin laminar y el último se laminó con hojas de etilén vinyl acetato (EVA) de 0.22 mm de espesor a 150°C. Las configuración de los arreglos analizados fueron las siguientes: (i) vidrio / PET+CuS / Vidrio (*horneados*) y (ii) vidrio / EVA / PET+CuS / EVA / vidrio (*laminados*). El vidrio claro utilizado tiene un espesor de 3mm, el PET tiene

0.1 mm de espesor, el EVA de 0.22 mm y la película delgada de CuS 0.1  $\mu\text{m}$  aproximadamente.

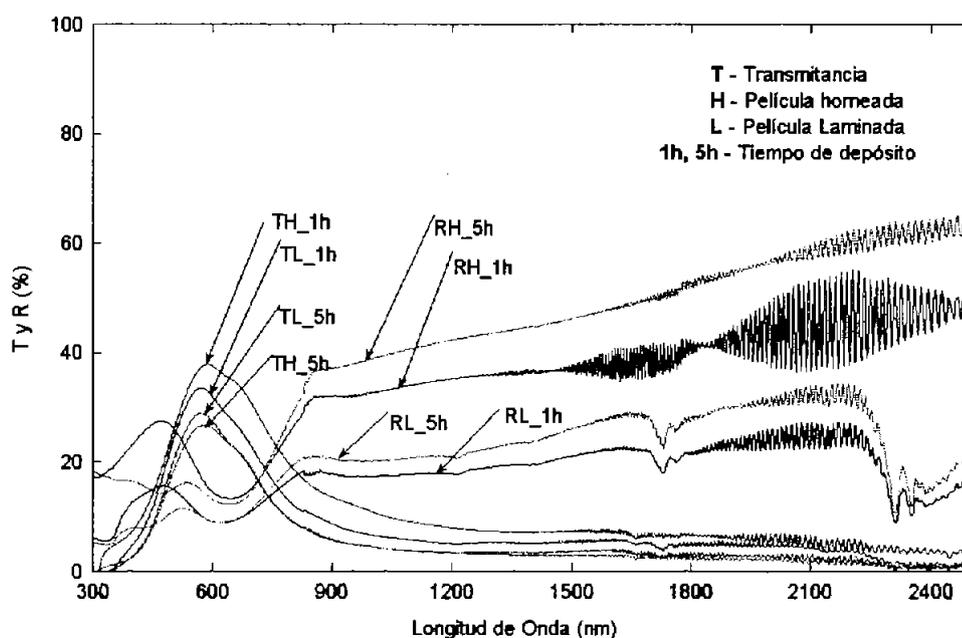
Se observó que existen diferencias en la transmitancia óptica de las películas *horneadas* y *laminadas*, Figura 2.5 (c). También existe una reducción de transmitancia de aproximadamente el 5% de las películas horneadas (Figura 2.5 (a)) o laminadas (Figura 2.5 (b)), comparadas a las películas sin hornear. Aquí se presentan los gráficos de transmitancia de las películas de CuS depositadas con una duración del depósito de 1 y 5 horas. Los espectros de transmitancia y reflectancia de los *avilcrasol* obtenidos tienen una gama de parámetros de control solar que van de 25 a 40% para  $T_{\text{VIS}}$ , y de 3 a 10% para  $T_{\text{IR}}$ .



(a)



(b)



(c)

**Figura 2.5** Patrones de transmitancia óptica (T) y reflectancia óptica (R) de películas de CuS, (a) homeadas y sin hornear, (b) sin hornear y laminadas y (c) homeadas y laminadas, depositadas sobre PET.

Se observa que el proceso de horneado y laminado tienen el mismo efecto en las PDS de CuS, en ambos casos, el patrón de transmitancia tipo campana que se forma en la región del visible (380-780 nm) se estrecha al someter la película al proceso de horneado y laminado, produciendo una transmitancia máxima a una longitud de onda de 565 nm. Dado que la máxima sensibilidad del ojo humano se encuentra aproximadamente en esa longitud de onda, el proceso de horneado o laminado mantienen la transmitancia selectivamente en dicha región y la reduce en la región del cercano infrarrojo, manteniendo el nivel de iluminación y evitando así el calentamiento interior. Este efecto se observa en la Figura 2.5 (a) y (b).

### **Baño químico “amoniacó”**

Se ha intentado utilizar la solución “cittrato” para depositar CuS sobre vidrio sin resultados favorables y solo se consiguen crecimientos de películas muy delgadas (menores a 50 nm de espesor) en 30 min de duración de depósito, ya que se desprenden con mayor tiempo de duración. Por otra parte el baño químico “amoniacó” utilizado para depositar CuS, dio resultados satisfactorios, alcanzando tiempos de depósito de hasta 6 horas a temperatura ambiente y espesores de película de hasta 180 nm [8], razón por la cuál se decidió utilizarla (Tabla 2.4). La duración de los crecimientos propuestos inicialmente fue de 2, 3 y 4 horas a temperatura ambiente sobre vidrios con película de ZnS como sustrato (Tabla 2.2) y sin ésta.

**Tabla 2.4.** Baño químico “amoniacó” para depositar PDS de  $Cu_xS$

Soluciones	Cantidad (ml)
Cloruro de Cobre ( $CuCl_2 \cdot 5H_2O$ ) 1M	5
Trietanolamina al 50% (TEA)	4
Amonia Concentrado ( $NH_4OH$ al 30%)	8
Hidróxido de Sodio (NaOH) 1M	10
Tiurea (TU) 1M	6
Agua Destilada	67
<b>Total</b>	<b>100</b>

Sin embargo, los depósitos de CuS por 4 horas sobre vidrio sin ZnS se desprendieron casi en su totalidad, descartándose para su aplicación en los *avilcrasol*, no así los depositados sobre vidrio con ZnS, que permanecieron sin desprenderse durante las 4 horas del depósito de CuS, de acuerdo a los resultados reportados por Nair y Nair [9].

La Figura 2.6 muestra los patrones de transmitancia en los *avilcrasol* que integran películas delgadas de CuS obtenidas con el baño químico “amoniaco”. La transmitancia en la región del visible es del 43% (CuS 2h 2L) al 20% (CuS 3h 2L) y de 2% a 10% en la región del cercano infrarrojo. Estos patrones ópticos cumplen los requerimientos de un controlador de la radiación solar, porque eliminan gran parte del calor contenido en la radiación infrarroja y permiten una buena iluminación en el interior de la habitación o el automóvil donde se apliquen este tipo de películas. El concepto de iluminación o densidad de flujo luminoso sobre una superficie que se utiliza en esta investigación no fue medido, solo se hace referencia a este cuando la percepción visual de iluminación disminuye al utilizar las PDS como filtro.

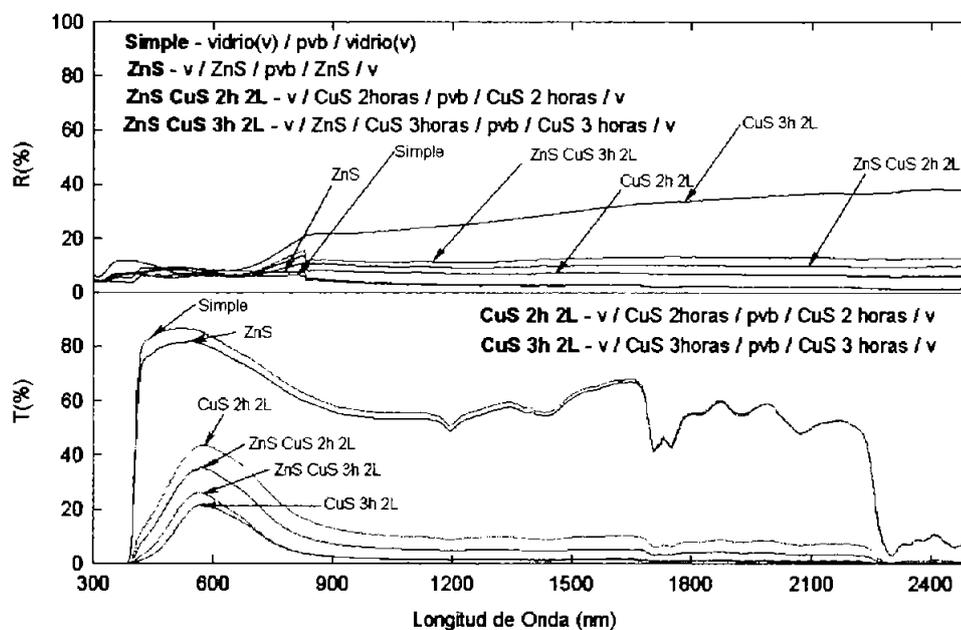


Figura 2.6 Espectros de transmitancia óptica (T) y reflectancia óptica (R) de *avilcrasol* con y sin ZnS.

Se observa de la Figura 2.6 que la película de ZnS no afecta las propiedades ópticas de los *avilcrasol*, su presencia reduce la transmitancia en aproximadamente 5%. Además

de los parámetros ópticos evaluados anteriormente y los cuales muestran una mejora en el crecimiento de las películas delgadas de CuS depositadas sobre sustratos de ZnS, es necesario cuantificar el aumento de adhesión en los *avilcrasol* que integran ZnS respecto a los que no. En el siguiente capítulo se presenta el desarrollo experimental para cuantificar la resistencia adhesiva de los *avilcrasol* con y sin ZnS como sustrato.

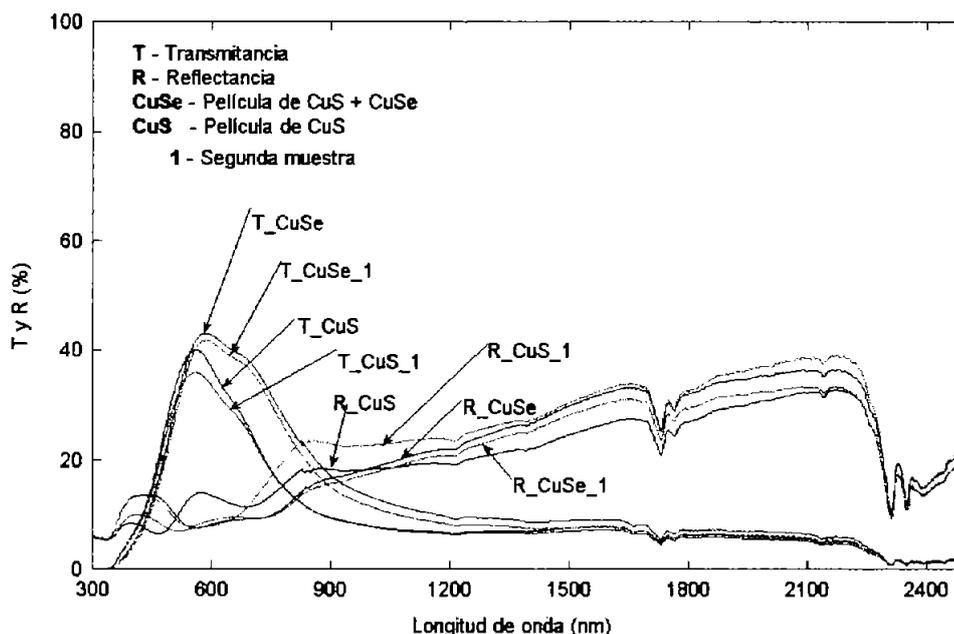
### 2.1.6 Depósito Químico de Películas Delgadas de $Cu_{2-x}Se$

Este tipo de película se ha caracterizado por su estabilidad al medio ambiente [10], además de proporcionar una tonalidad diferente a los *avilcrasol* cuando se deposita sobre CuS y se lamina en autoclave a 130°C durante 30 minutos. Se ha trabajado con dos baños químicos diferentes (1) y (2) para depositar  $Cu_{2-x}Se$ : (1) para crecimiento de películas con espesores de hasta 200 nm, y (2) como una película de protección a las películas de CuS. El baño (1) se utiliza como protección contra la intemperie de las películas de CuS, y consiste en dejar inmersas éstas durante 5 minutos en la solución de  $Cu_{2-x}Se$  a temperatura ambiente. El baño (2) se utiliza para obtener películas de  $Cu_{2-x}Se$  sobre PET sin depósitos previos de CuS. Para la obtención de  $Cu_{2-x}Se$  con el baño (2) se requiere que la temperatura del baño químico se mantenga en 60°C durante el tiempo que dure el depósito y se optó por utilizar únicamente la formulación (1). La Tabla 2.5 muestra las dos formulaciones para obtener las películas de  $Cu_{2-x}Se$ .

**Tabla 2.5** Baños químicos para depositar películas de  $Cu_{2-x}Se$  sobre PET.

Formulación 1	Volumen (ml)
CuCl <sub>2</sub> 1M	2.5
Agua deionizada	483
NH <sub>3</sub> OH al 30%	2
NaSeSO <sub>3</sub> 0.4 M	12.5
<b>Total</b>	<b>500</b>
Formulación 2	Volumen (ml)
CuSO <sub>4</sub> 0.5M	50
NH <sub>3</sub> OH al 30%	25
NaSeSO <sub>3</sub> 0.4 M	50
Agua deionizada	375
<b>Total</b>	<b>500</b>

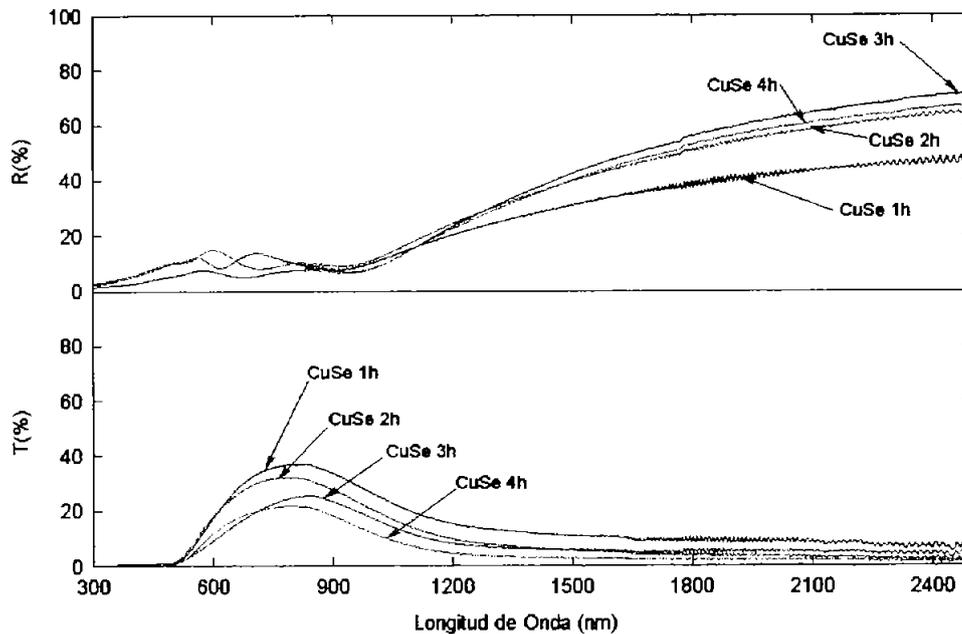
Además de proporcionar protección contra el medio ambiente, las películas de  $\text{Cu}_{2-x}\text{Se}$  modifican la tonalidad del vidrio laminado cuando se lleva a cabo el proceso de laminación. Después de depositar la película de  $\text{Cu}_{2-x}\text{Se}$  sobre la de  $\text{CuS}$  no se notan cambios de tonalidad, sin embargo después del proceso de laminación se observa este cambio, que pasa de verde olivo ( $\text{CuS}$ ) a dorado ( $\text{CuS} + \text{Cu}_{2-x}\text{Se}$ ). Esto se puede observar en los patrones de transmitancia que se muestran en la Figura 2.7, donde se muestra que la curva de transmitancia en la región visible de la película de  $\text{CuS}$  es más cerrada que la de  $\text{CuS-Cu}_{2-x}\text{Se}$  y esto da como resultado el cambio de tonalidad antes mencionado.



**Figura 2.7** Transmitancia óptica y Reflectancia óptica de películas de  $\text{CuS}$  y  $\text{CuS-Cu}_{2-x}\text{Se}$  sobre PET con una duración de depósito de 2 horas para el  $\text{CuS}$  y 5 min para el  $\text{Cu}_{2-x}\text{Se}$ .

Las películas de  $\text{Cu}_{2-x}\text{Se}$  depositadas sobre PET presentan espectros de transmitancia y reflectancia aceptables como controladores de la radiación solar; sin embargo, como se mencionó anteriormente el proceso de obtención es complicado para áreas grandes y se desistió hacer uso de ellas. La Figura 2.8 muestra los espectros de transmitancia y reflectancia de películas de  $\text{Cu}_{2-x}\text{Se}$  depositadas en PET, en la cuál se muestra que la transmitancia en la región del cercano infrarrojo es ligeramente mayor que la del  $\text{CuS}$

(Figura 2.6) y esto contribuye al calentamiento interior y no mejora la iluminación interior de la habitación.



**Figura 2.8** Transmitancia óptica y reflectancia óptica de PDS de  $\text{Cu}_{2-x}\text{Se}$  depositadas sobre PET durante 1, 2, 3 y 4h, con espesores aproximados de 40 nm a 180 nm).

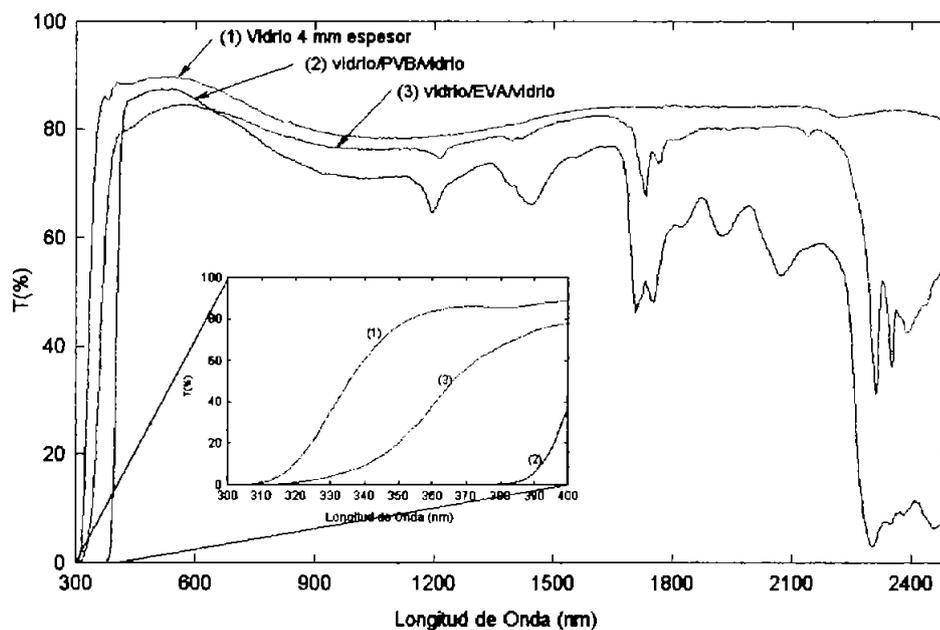
## 2.2 Proceso de Laminación de los Avilcrasol

En este apartado se mostrará el proceso de laminación de los *avilcrasol*, sus características y los parámetros más importantes que se deben cuidar para un laminado de calidad. El polímero de laminación más utilizado en la actualidad por la industria arquitectónica y automotriz es el PVB, aunque en algunos casos se utiliza el etilén vinyl acetato (EVA) para uso en arquitectura. El proceso para laminar un vidrio consiste en armar los elementos componentes, que en el caso de un vidrio laminado sencillo son: vidrio claro de 2 o 3 mm, una hoja de PVB de 0.38 mm de espesor (estándar) o 0.76 mm de espesor (alto impacto, para uso automotriz) y vidrio claro de 2 o 3 mm. Una vez ensamblado el vidrio se le aplica calor ( $140^{\circ}\text{C}$ ) y presión ( $13.5\text{ kg/cm}^2$ ) durante un tiempo específico (30 min), en el cuál se lleva a cabo la unión de los tres elementos. La apariencia que presenta el vidrio laminado es igual a un vidrio monolítico, excepto cuando se integran PDS de CuS o  $\text{CuS-Cu}_{2-x}\text{Se}$ .

Como se mencionó en el Capítulo 1, la adhesión juega un papel muy importante en el comportamiento mecánico de los vidrios laminados, razón por la que se debe tener especial cuidado en mantener ésta dentro de los límites permisibles por los fabricantes de vidrio laminado. Para lograr esto, se debe controlar constantemente la humedad del PVB, la limpieza de los vidrios, así como la dureza del agua con la que se lavan y por último la humedad relativa del espacio de trabajo. Estos factores influyen de manera considerable en la resistencia adhesiva de los vidrios laminados.

### 2.2.1 Tipos de Avilcrasol Utilizados

Inicialmente se tenía contemplado trabajar con dos polímeros de laminación, que son el EVA y el PVB; pero, dadas las tendencias de la industria fabricante de vidrio laminado a utilizar solamente PVB, por que tienen mejores características mecánicas y ópticas, se optó por trabajar solamente con PVB. La Figura 2.9 muestra la diferencia en las propiedades ópticas de vidrios laminado con EVA y PVB, específicamente en la región del UV. La transmitancia del vidrio laminado con PVB en la región del UV es de aproximadamente el 1%, mientras que el laminado con EVA es de aproximadamente un 35% en la misma región (ver Capítulo 3).



**Figura 2.9** Transmitancia óptica de vidrios laminados con EVA (2) y PVB (3) en la región del UV, comparada con un vidrio claro de 4 mm de espesor (1).

Las configuraciones de *avilcrasol* utilizadas en este proyecto de investigación incluyen aquellos que están laminados con EVA y PVB, pero sólo los laminados con PVB se caracterizaron mecánicamente. La Figura 2.10 muestra los tres tipos de *avilcrasol* utilizados en esta investigación.

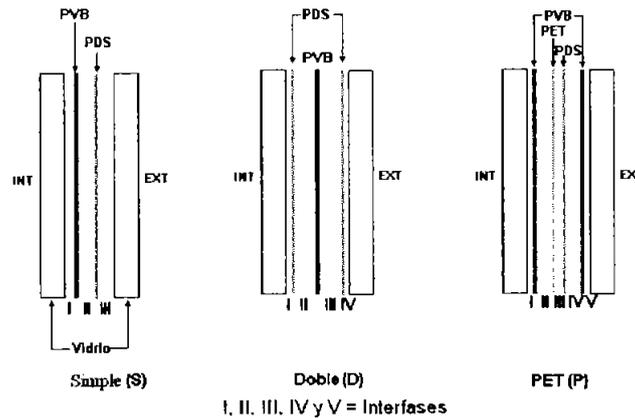


Figura 2.10 Elementos componentes de los *avilcrasol* y sus interfases

En la configuración simple (S) la PDS se deposita sólo en un vidrio, quedando el otro vidrio en contacto con el PVB solamente; en la configuración doble (D) se depositan una PDS a cada vidrio y éstos se unen con una hoja de PVB, y finalmente en la configuración PET (P) se deposita una PDS sobre el PET y éste a su vez se coloca entre dos hojas de PVB y dos de vidrio. Los patrones de transmitancia óptica y reflectancia especular de estas configuraciones es diferente, así como sus propiedades mecánicas. En el Capítulo 3 y 4 se presenta la influencia que tienen las PDS de CuS y Cu<sub>2-x</sub>Se depositadas sobre vidrio y PET respectivamente, en la adhesión de los *avilcrasol*, en comparación con la resistencia adhesiva de un vidrio laminado convencional o simple (vidrio / PVB / vidrio).

## 2.2.2 Especificaciones del PVB

El poli (vinyl butyral) (PVB) es un derivado del poli vinyl alcohol (PVA), el cual se puede obtener mediante la reacción con el butyral aldeído. La reacción es una acetalización intramolecular e involucra grupos glycol del PVA en las posiciones 1 – 3 del siguiente esquema [11]:

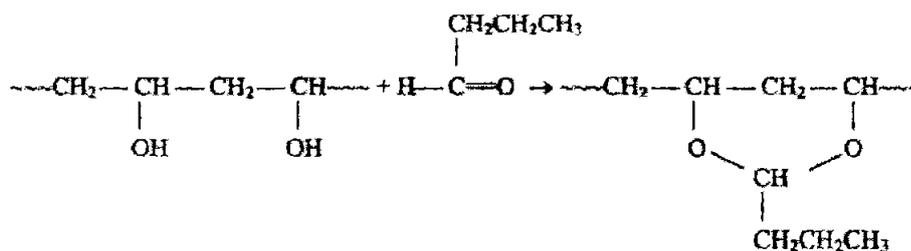


Figura 2.11. Esquema de la cadena polimérica del PVB [10].

A pesar de su nombre común "poly(vinyl butyral)", el producto de la reacción precedente es de hecho un co-polímero, dado que cierto número de grupos de vinyl alcohol sin reaccionar permanecen en la cadena macromolecular de acuerdo a la estequiometría de los reactantes. El PVA es, a su vez, un derivado del poly(vinyl acetato) (PVAc) y de aquí contiene una pequeña fracción de vinyl acetato que permanece después de la hidrólisis. De hecho, dependiendo de la razón molar de los dos reactantes y del grado de hidrólisis del PVA inicial, pueden surgir aleatoriamente diferentes composiciones de polímeros ternarios de PVB. En casi todos los casos, sin embargo, el PVB consiste predominantemente de unidades de alcohol (10%) y butyral (90%). Dependiendo del peso molecular y el grado de butyralización, el PVB puede presentar una amplia gama de propiedades. Como regla general, remplazando las unidades de vinyl alcohol por unidades de butyral, tenemos un polímero hidrofóbico, insoluble en agua excepto para aquellos PVB con un bajo contenido de butyral, y causa un incremento en la resistencia y adhesión con una amplia gama de sustratos [11].

Independientemente de la cantidad de PVA contenido en la molécula del polímero, el contenido de humedad de la hoja de PVB es muy importante para conseguir una buena adhesión al vidrio [7]. La excesiva humedad de la hoja o de sus superficies ocasiona que el contacto PVB – vidrio disminuya por el exceso de agua. El contenido de humedad de los fabricantes de PVB no debe exceder del 0.50% (w/w), y se debe almacenar en un ambiente con una humedad relativa controlada de 25 a 30%. En condiciones ambientales normales (aproximadamente 55% – 65% de humedad relativa, dependiendo de las condiciones del clima), la hoja de PVB absorbe rápidamente humedad hasta alcanzar valores de 1.0% a 1.4%. Las propiedades adhesivas del PVB se modifican por los minerales presentes por la dureza del agua, lo cual forma

depósitos en la superficie del vidrio si éste no se ha lavado adecuadamente con jabón y agua desionizada. Las Figuras 2.12, 2.13 y 2.14 muestran la relación existente entre la humedad relativa (HR) del ambiente, la humedad del PVB y la resistencia máxima al esfuerzo cortante [7].

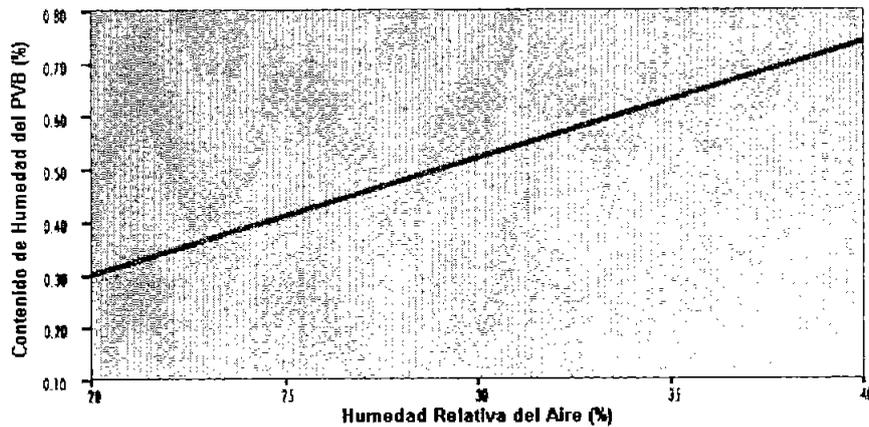


Figura 2.12 Variación del contenido de humedad del PVB respecto a la humedad relativa del aire [7].

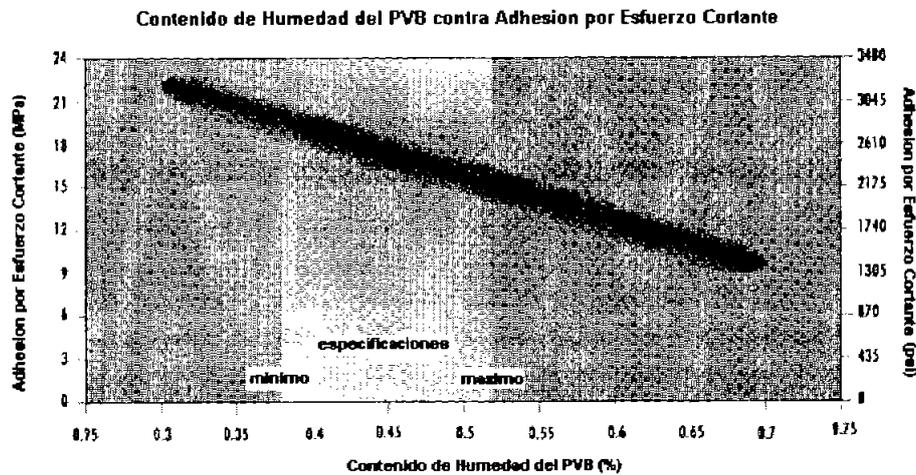


Figura 2.13. Relación del contenido de humedad del PVB respecto al esfuerzo cortante máximo [7].

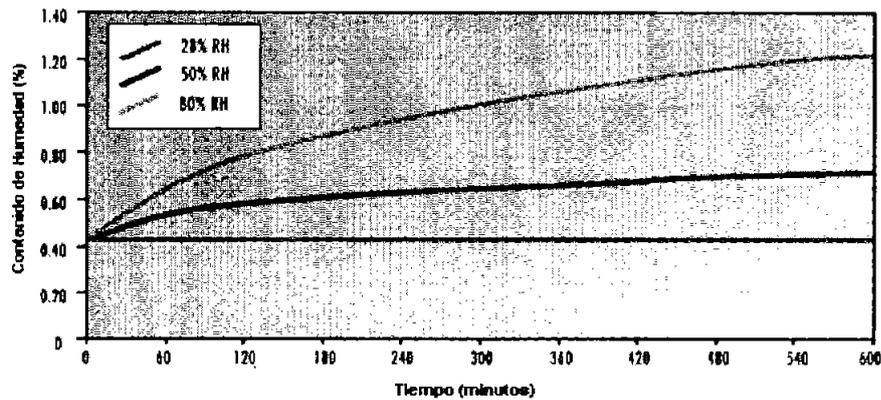


Figura 2.14 Absorción de humedad del PVB en función de la H. R. del aire [7].

Las figuras anteriores muestran la importancia que tiene el control del contenido de humedad del PVB y la HR del ambiente para mantener los niveles de adhesión dentro los parámetros adecuados para su uso en la fabricación de vidrios laminados. Cabe mencionar que los valores que muestran las figuras anteriores son específicas para el PVB fabricado por la compañía Trosifol® y pueden variar entre un fabricante y otro de acuerdo a la composición del PVB, pero en general, este comportamiento es similar en la mayoría de los PVB. Se observa de la Figura 2.13 la importancia que tiene la humedad del polímero en la adhesión de éste al vidrio, por esta razón se debe tener especial cuidado en mantener las condiciones ambientales adecuadas durante el proceso de fabricación de los vidrios laminados.

Las condiciones para la fabricación de vidrios laminados son: almacén y cuarto de ensamble con temperatura y humedad relativa controladas,  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  y  $50 \pm 5\%$  HR respectivamente, cuarto cerrado y sistema de agua desionizada para el lavado de vidrios. Para obtener vidrios laminados con buena calidad, es necesario llevar a cabo un proceso de fabricación muy riguroso en cuanto a limpieza de los vidrios y el área de trabajo, ya que es muy fácil contaminar con polvo y pelusa los vidrios a laminar. A continuación se describen los procesos de pre-laminación y laminación de vidrios.

### 2.2.3 Proceso de Pre-laminación

Como se mencionó anteriormente, la hoja de vidrio monolítico debe someterse a un riguroso proceso de limpieza con jabón neutro y agua destilada, para eliminar las sales minerales que puedan inhibir la adhesión del PVB al vidrio. Con el vidrio limpio, se procede a ensamblar el vidrio laminado, en una habitación con condiciones ambientales controladas e iniciar el proceso de pre-laminación. Existen dos tipos de procesos de pre-laminación, uno es por vacío y el otro por medio de rodillos. A continuación se presentan ambos.

#### a) Pre-laminación por vacío

1. Se corta la película, el vidrio y el polímero de laminación (PVB o EVA) a las dimensiones que se requiere fabricar el *avilcrasol*.
2. Se acomodan los elementos emparedándolos, el orden varía según el tipo de *avilcrasol*, la figura 2.12 muestra el orden a seguir.
3. Se presionan firmemente los elementos componentes del *avilcrasol* y se envuelven con una tela de algodón y se fijan con cinta adhesiva. Esto tiene como finalidad evitar desplazamientos relativos de los vidrios.
4. Se introduce el *avilcrasol* dentro de una bolsa de neopreno, la cual cuenta con una válvula para extraer el aire de su interior. La bolsa de neopreno tiene en su interior una tela que permite el libre paso del aire evacuado y uniformiza la presión que la bolsa ejerce al vidrio a causa del vacío generado. Después de introducir los *avilcrasol* a la bolsa, ésta se sella herméticamente con pinzas mecánicas y se introduce al horno. Se coloca la conexión de vacío y se genera el vacío durante 10 minutos antes de encender el horno.
5. Transcurridos los 10 minutos de vacío sin temperatura, se enciende el horno a una temperatura de 90°C durante 30 minutos. Si se utiliza EVA como polímero de laminación, la temperatura se debe aumentar a 130°C. El tiempo y la temperatura de laminación pueden variar de acuerdo a las necesidades del fabricante. Es posible aumentar la temperatura del horno, siempre y cuando el tiempo de pre-laminación se reduzca.

6. Transcurridos los 30 minutos se apaga el horno y se deja enfriar a temperatura ambiente manteniendo el vacío, en caso contrario entrará aire a la bolsa y se formaran burbujas en el laminado.
7. Cuando la bolsa esta a temperatura ambiente, se rompe el vacío y se extraen los laminados de la bolsa. Es muy importante dejar que la temperatura sea menor a 50°C para poder retirar los laminados de la bolsa, de lo contrario se formarán burbujas en los extremos del laminado.
8. Los vidrios laminados con EVA quedan listos para ser usados, y los laminados con PVB requieren de un proceso adicional de laminación.

*b) Pre-laminación con rodillos*

Este procedimiento consiste en aplicar una carga de 2 kg/cm<sup>2</sup> al *avilcrasol* mediante dos pares de rodillo de goma que se encuentran colocados a la entrada y salida de un horno eléctrico. El horno debe estar a una temperatura de 250°C y la velocidad de los rodillos debe ser de 20 mm/min. La figura 2.15 muestra el proceso de laminación por rodillos. Este tipo de pre-laminación es el más adecuado cuando se laminan vidrios con grandes dimensiones.

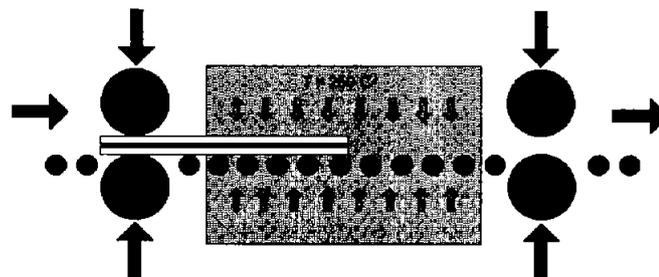


Figura 2.15 Pre-laminación por rodillos

**2.2.4 Proceso de Laminación**

Los vidrios laminados que utilizan PVB como polímero de laminación, requieren ser pre-laminados antes de iniciar este proceso. Se tiene que efectuar el procedimiento descrito en el apartado 2.2.3 y posteriormente realizar el procedimiento que a continuación se describe:

1. El vidrio ya pre-laminado se introduce en la autoclave y se cierra herméticamente.

2. El tiempo total del proceso depende en gran medida del equipo con el que se cuente y puede variar de una a seis horas, dependiendo del programa a utilizar (razón de incremento de presión, nivel de presión, curva de temperatura, etc.)
3. Para fijar el tiempo de laminación, se debe tener en cuenta la cantidad de vidrios a laminar (tamaño de los vidrios, número de elementos por vidrio laminado, etc.)
4. La calidad del vidrio laminado dependerá de varios factores, como son la presión del autoclave y la temperatura de laminación.
5. Los vidrios laminados se deben calentar y enfriar lentamente para obtener vidrios libres de esfuerzos.
6. Se debe evitar el contacto vidrio – metal, ya que puede originar variaciones de temperatura en la superficie del vidrio y posteriormente su fractura.
7. La distancia entre cada vidrio laminado debe ser aproximadamente igual a su espesor. Comúnmente se utilizan maderas ranuradas o bases de silicón para la colocación de los vidrios.
8. Se deben elevar simultáneamente la presión y temperatura.
9. Para vidrios delgados, el tiempo de laminación debe ser de 30 minutos como mínimo.
10. La presión de la autoclave debe ser de  $13 \text{ kgcm}^{-2}$  durante el tiempo de laminación y el posterior tiempo de enfriamiento.
11. La temperatura de laminación se debe mantener en un rango de  $135$  a  $145^{\circ}\text{C}$  ( $275$  a  $293^{\circ}\text{F}$ ). Este es un requerimiento obligatorio, aunque se pueden obtener vidrios transparentes a temperaturas y presiones inferiores, pero su nivel de adhesión será bajo.
12. Se deben evitar temperaturas por arriba de  $160^{\circ}\text{C}$  ( $320^{\circ}\text{F}$ ), ya que el PVB se degrada a ésta temperatura tomando una coloración amarilla.
13. En la fase de enfriamiento, se debe esperar hasta que el autoclave alcance una temperatura de  $40^{\circ}\text{C}$ , con el autoclave presurizado. Una vez que se llega a  $40^{\circ}\text{C}$ , se despresuriza y se retiran los vidrios laminados de la autoclave.

### **2.3 Preparación de Probetas para Prueba de Resistencia Adhesiva**

La dimensión de los *avilcrasol* utilizados en ésta investigación fue de 100 mm x 125 mm, de los cuales se obtuvieron probetas con una dimensión de 25 mm x 25 mm. La resistencia adhesiva de los *avilcrasol* se determinará por medio del método de prueba de corte compresivo, que se describirá más adelante en este capítulo. Este tipo de prueba requiere que las dimensiones de la probeta de vidrio laminado sean de 625 mm<sup>2</sup>, cuidando que al menos un par de extremos sean paralelos. El corte de las probetas de *avilcrasol* se debe hacer de manera muy cuidadosa, evitando fisuras en los extremos que puedan causar fallas prematuras durante la prueba. Para el corte de las probetas de *avilcrasol* se utilizó una cortadora con rueda de diamante de 1 mm de espesor. Esto permite obtener cortes muy finos y libres de fisuras en los extremos del vidrio.

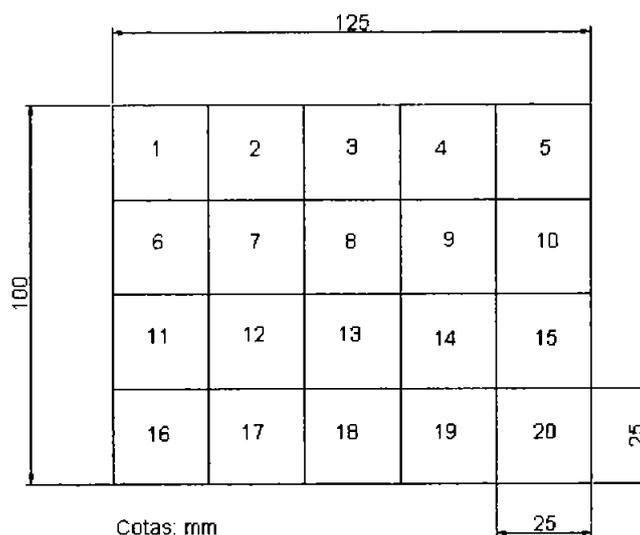
#### **2.3.1 Obtención de las Probetas para las Pruebas de Corte-Compresivo**

Inicialmente las probetas obtenidas de los *avilcrasol* se cortaron de forma aleatoria, es decir, se seleccionaba el lado más uniforme del *avilcrasol* y de ahí se obtenían. Se daba el caso que las cinco probetas utilizadas para la prueba de resistencia adhesiva se obtuvieran de un solo extremo del *avilcrasol*. Esto ocasionó que los resultados de resistencia adhesiva presentaran variaciones muy grandes, hasta del 40% del máximo valor medido. Según las normas internas automotrices, la desviación estándar no puede exceder el 10% del valor medido para tener un proceso y producto confiable, razón por la cuál se tuvo que diseñar un experimento que permitiera reducir las desviaciones al mínimo.

La hipótesis sobre las grandes variaciones en los valores de resistencia adhesiva fue que, durante el proceso de pre-laminación la evacuación del aire del interior del *avilcrasol* inicia de la parte central hacia los extremos del mismo. Por tanto, si el proceso de pre-laminación no tiene el tiempo adecuado para evacuar la totalidad del aire, se espera que los valores mayores de adhesión se tengan en la parte central. Si no se tiene el cuidado de seleccionar adecuadamente las probetas, es decir solo la

parte central del *avilcrasol*, se tendrán variaciones muy grandes y por tanto resultados no satisfactorios.

Para validar ésta hipótesis, se utilizaron dos tipos de vidrios laminados simples, a) 2 vidrios claros comerciales de 3 mm de espesor y una hoja de PVB de 0.76 mm de espesor y b) 2 vidrios claros de 3 mm y PVB con el mismo espesor que el vidrio anterior suministrados por la empresa Sekisui. Se obtuvieron 20 probetas de 625 mm<sup>2</sup> de cada vidrio laminado a) y b). La Figura 2.16 muestra un esquema de la distribución de las probetas para la prueba de corte compresivo.



**Figura 2.16** Corte del *avilcrasol* para las pruebas de adhesión.

A cada una de las probetas obtenidas de los dos vidrios laminados utilizados en este experimento, se les realizó la prueba de adhesión por corte compresivo, con el propósito de observar la distribución de la resistencia adhesiva en todo el *avilcrasol*, y así determinar que parte de éste se utilizará para posteriores pruebas experimentales. Las Figuras 2.17 a y b muestran la distribución de adhesión o resistencia adhesiva de los vidrios laminados antes mencionados. Se puede observar que, efectivamente la mayor resistencia adhesiva se encuentra en la parte central del *avilcrasol*, disminuyendo ésta en los extremos, con lo que se comprueba la hipótesis planteada anteriormente. Los valores mostrados están en MPa e indican la resistencia adhesiva de cada probeta en particular.

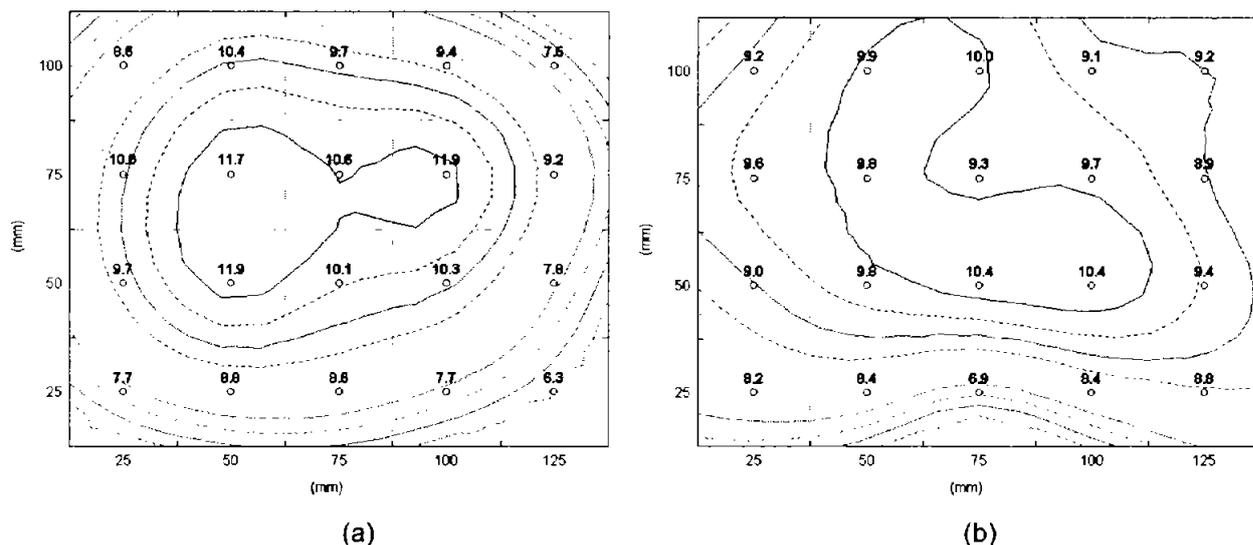


Figura 2.17 Distribución de la adhesión en vidrios laminados sencillos.

Para las pruebas experimentales posteriores de resistencia adhesiva, es necesario determinar si una muestra es estadísticamente diferente de otra o si existe variación en los datos de una sola muestra. De la figura 2.17 no es posible determinar si la variación entre los datos medidos es a causa de errores de medición o errores propios de los procesos de pre-laminación y laminación. Si se quiere hacer una inferencia estadística de cual de los dos factores, errores de medición o errores de laminación, influye más en la variación de datos, es necesario hacer un análisis de varianza. En el apéndice B se presenta la teoría para el análisis de varianza, específicamente utilizando las pruebas paramétricas  $t$  de student y  $F$  que se utilizan en éste trabajo de investigación.

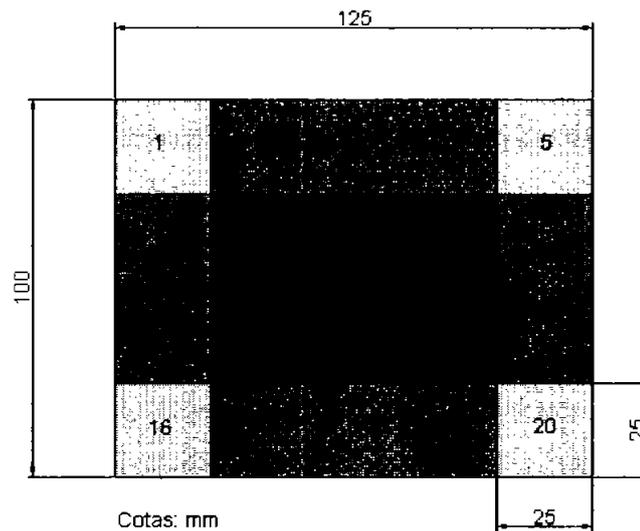
Para el análisis estadístico de los valores de resistencia adhesiva de los *avilcrasol*, primeramente se analizarán las diferencias entre las medias y desviaciones estándar, para determinar si existen diferencias significativas entre uno y otro. La Tabla 2.6 muestra los valores de la resistencia adhesiva para cada *avilcrasol* en particular. Con  $n_a=20$  (número de probetas del *avilcrasol* 1),  $n_b=20$  (número de probetas del *avilcrasol* 2),  $N=40$  (probetas totales) y  $k=2$  (número de *avilcrasol*), se calculan los valores de  $s_B^2$ ,  $s_W^2$  y  $F$ , y tenemos que:  $s_B^2 = 0.3027$ ,  $s_W^2 = 1.5236$  y  $F = 0.1987$ . Con  $(N-k) = 38$  y  $(k-1) = 1$  grados de libertad, con un nivel de significancia de 0.05 el valor de  $F$  es de 4.098.

**Tabla 2.6** Análisis estadístico de pruebas  $F$  y  $t$  de *student* para los *avilcrasol* a y b de la Figura 2.17.

Avilcrasol a			Avilcrasol b		
Probeta	Adhesión (MPa)	$(\bar{x}_i - \bar{x}_a)^2$	Probeta	Adhesión (MPa)	$(\bar{x}_i - \bar{x}_a)^2$
1	8.62	0.6022	1	9.23	0.0001
2	10.37	0.9487	2	9.93	0.5013
3	9.72	0.105	3	10	0.6053
4	9.42	0.0006	4	9.12	0.0104
5	7.47	3.7095	5	9.23	0.0001
6	9.98	0.3411	6	9.62	0.1584
7	11.73	5.4476	7	9.82	0.3576
8	10.61	1.4738	8	9.28	0.0034
9	11.9	6.2700	9	9.68	0.2098
10	9.15	0.0605	10	8.94	0.0795
11	9.69	0.0864	11	8.99	0.0538
12	11.86	6.0713	12	9.76	0.2894
13	10.14	0.5535	13	10.36	1.2950
14	10.27	0.7639	14	10.44	1.4835
15	7.81	2.5154	15	9.38	0.025
16	7.74	2.7423	16	8.2	1.0445
17	8.77	0.3919	17	8.4	0.6757
18	8.61	0.6178	18	6.92	5.2992
19	7.73	2.7756	19	8.37	0.7259
20	6.33	9.4004	20	8.77	0.2043
<b>Media</b>	<b>9.3960</b>			<b>9.2220</b>	
<b>Desv. Est.</b>		<b>1.4980</b>			<b>0.8069</b>
$\sum_{i=1}^{n_k} (x_i - \bar{x}_k)^2$		<b>44.8773</b>			<b>13.0221</b>
$n_n (\bar{x}_k - \bar{x}_g)^2$	<b>0.0075</b>			<b>0.0075</b>	
$(N-k)$	<b>38</b>			<b>38</b>	
$(k-1)$	<b>1</b>			<b>1</b>	
$\bar{x}_g = \left( \frac{\bar{x}_a + \bar{x}_b}{2} \right)$	<b>9.3090</b>				
<b>s</b>	<b>1.5236</b>				
<b>t</b>	<b>0.3611</b>		$t_{0.05}$	<b>1.6840</b>	<b>Se acepta <math>H_0</math></b>
$s_B^2$	<b>0.3027</b>				
$s_W^2$	<b>1.5236</b>				
<b>F</b>	<b>0.1987</b>		$F_{0.05}$	<b>4.098</b>	<b>Se acepta <math>H_0</math></b>

La hipótesis nula  $H_0$  es que no hay diferencia entre las medias y desviaciones estándar de las muestras  $a$  y  $b$  y la hipótesis alterna  $H_1$  es que si hay diferencias. Dado que, tanto los valores calculados de  $F$  y  $t$  son menores que los valores críticos tabulados ( $F_{0.05}$  y  $t_{0.05}$ ), la hipótesis nula se acepta. Se infiere por tanto, que la variación de la resistencia adhesiva entre las muestras  $a$  y  $b$  no es significativa.

Una vez conocido lo anterior, se analizarán tres regiones diferentes en un mismo *avilcrasol*, para determinar si existen diferencias en la resistencia adhesiva dentro de las muestras mismas. Con este análisis se pretende determinar si los procesos de pre-laminación y laminación ocasionan esta variación. Si los errores son en la medición de la resistencia adhesiva, entonces se espera que la varianza en las tres regiones sea muy similar, es decir, que la hipótesis nula propuesta anteriormente se acepte. De no ser así, la varianza entre muestras se puede atribuir a los procesos de pre-laminación y laminación. La Figura 2.18 muestra las tres regiones que se analizarán de los *avilcrasol*. Se analizará la varianza entre las tres regiones de una misma muestra, para cada *avilcrasol*.



**Figura 2.18** Selección de las tres zonas de análisis de un *avilcrasol*. Zona central (7, 8, 9, 12, 13 y 14 en color rojo), zona media (2-4, 6, 10, 11, 15, 17-19 en color naranja) y zona esquinas (1, 5, 16 y 20 en amarillo).

Primeramente se comparó la zona central con la zona media, luego la zona central con la zona de las esquinas y finalmente la zona media con la zona de las esquinas. Las Tablas 2.7 y 2.8 muestran los resultados del análisis estadístico, tanto de la prueba  $F$  como de la prueba  $t$  de *student* para los *avilcrasol*  $a$  y  $b$ . Se utilizan las mismas ecuaciones presentadas anteriormente para el análisis de varianza, solo cambia el número de elementos de cada muestra (zona central  $n = 6$ , zona media  $n = 10$  y zona de esquinas  $n = 4$ ).

**Tabla 2.7** Pruebas  $F$  y  $t$  de *student* para las zonas central y media del *avilcrasol a*.

Zonas	$F$	$F_{0.05}$	$H_0$	$t$	$t_{0.05}$	$H_0$
central vs. media	20.34	4.6	No se acepta	51.82	2.15	No se acepta
central vs. esquinas	40.94	5.32	No se acepta	37.60	2.31	No se acepta
media vs. esquinas	10.78	4.75	No se acepta	34.55	2.18	No se acepta

**Tabla 2.8** Pruebas  $F$  y  $t$  de *student* para las zonas central y media del *avilcrasol b*.

Zonas	$F$	$F_{0.05}$	$H_0$	$t$	$t_{0.05}$	$H_0$
central vs. media	5.64	4.6	No se acepta	60.54	2.15	No se acepta
central vs. esquinas	12.69	5.32	No se acepta	138.43	2.31	No se acepta
media vs. esquinas	0.6124	4.75	Se acepta	44.081	2.18	No se acepta

Los resultados anteriores muestran que la variación entre las tres zonas analizadas de cada *avilcrasol* es muy grande, dado que tanto en la prueba  $F$  como en la de  $t$  de *student* se observa este comportamiento. Como los procesos de pre-laminación y laminación se llevaron a cabo en la empresa Sekisui S-Lec de México, no se pudo tener el control de éstos, ya que están diseñados para unas necesidades de aseguramiento de calidad específicas. Por tanto, se decidió utilizar sólo las probetas de la parte central de todo *avilcrasol* analizado.

Siguiendo este criterio, la desviación estándar para el *avilcrasol a*, considerando sólo las seis probetas de la parte central, es de 0.83 MPa, y si se toma en cuenta que el valor máximo medido fue de 11.90 MPa, entonces la desviación estándar equivale aproximadamente al 7%. Para el *avilcrasol b* el valor máximo medido fue de 10.44 MPa y la desviación estándar equivale aproximadamente al 4% de éste valor. Comercialmente, estos valores de la desviación estándar son aceptables como una medida de la resistencia adhesiva de los *avilcrasol* o vidrios laminados.

## 2.4 Caracterización Óptica

Para evaluar las propiedades ópticas de los *avilcrasol*, se utilizaron las ecuaciones presentadas en el apéndice A. Las mediciones de transmitancia y reflectancia se realizaron con un espectrofotómetro Shimadzu 3101 PC con lámparas de deuterio y tungsteno-halógeno, cuya longitud de onda abarca de 190 a 3100 nm. El intervalo de interés para evaluar los *avilcrasol* es de 250 a 2500 nm, que es donde se presenta la mayor carga energética de la radiación solar. Se utilizó inicialmente el Software Trabsol, diseñado en el CIE-UNAM, para el cálculo de las propiedades ópticas de los *avilcrasol*, sin embargo las nuevas tendencias en el diseño de vidrios con filtros para el control de la radiación solar, sugieren el uso de la norma ISO 9050. Trabsol utiliza una irradiancia espectral de dos masas de aire (AM2) para el cálculo de los parámetros ópticos, y la norma ISO utiliza la combinación de la irradiancia espectral del iluminante D65 con la sensibilidad del ojo humano. En el apéndice A se hace referencia al cálculo de éstos parámetros.

Con el objetivo de conocer el comportamiento óptico de las PDS, con base en su espesor y conductividad eléctrica, se desarrolló un modelo teórico utilizando las ecuaciones presentadas en el apéndice A, correspondiente a la interacción electromagnética de la radiación solar con las películas delgadas semiconductoras. Se tiene que las películas de CuS y Cu<sub>2-x</sub>Se son semiconductores degenerados tipo *p*. Su conductividad eléctrica es típicamente  $> 2 \times 10^3 \Omega^{-1}\text{cm}^{-1}$ , lo cual satisface  $\sigma > \frac{2\pi c}{\lambda} \epsilon_0 \epsilon_r$  ( $v$  es la velocidad de la luz,  $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ F m}^{-1}$ ,  $\epsilon_r$  es la permitividad relativa, alrededor de 10) para una longitud de onda ( $\lambda$ ), típicamente  $> 1000 \text{ nm}$ . Bajo estas condiciones, la reflectancia es:

$$R(\%) = 100 \left[ 1 - 4 \left( \frac{\pi v \epsilon_0}{\lambda \sigma} \right)^{1/2} \right] \text{ alta, } > 40\% \text{ y} \quad 1.9$$

$$T(\%) = [100 - R(\%)] e^{-\alpha_c d}; \quad \alpha_c = \left( \frac{4\pi\sigma}{v\epsilon_0\lambda} \right)^{1/2} (\approx 10^5 \text{ cm}^{-1}) \quad 2.1$$

Considerando la propagación de la radiación electromagnética a través de un semiconductor parcialmente conductor (Apéndice A) se puede obtener la curva teórica de transmitancia en las regiones UV y VIS. Las condiciones de este comportamiento son las siguientes:

Para una  $\lambda < \lambda_g$ ;  $\lambda_g$  (nm) = 1240/(2eV) y bajo estas condiciones, la transmitancia óptica es:

$$T(\%) = 90 * e^{-\alpha_g * d}; \text{ donde } \alpha_g = cte * \lambda \left[ \frac{1240}{\lambda} - 2 \right]^{3/2}$$

La Figura 2.19 muestra las curvas teóricas de reflectancia y transmitancia en un medio conductor (conductividad,  $5 \times 10^3 \Omega^{-1} \text{cm}^{-1}$ ) y semiconductor (brecha de energía de 2 eV).

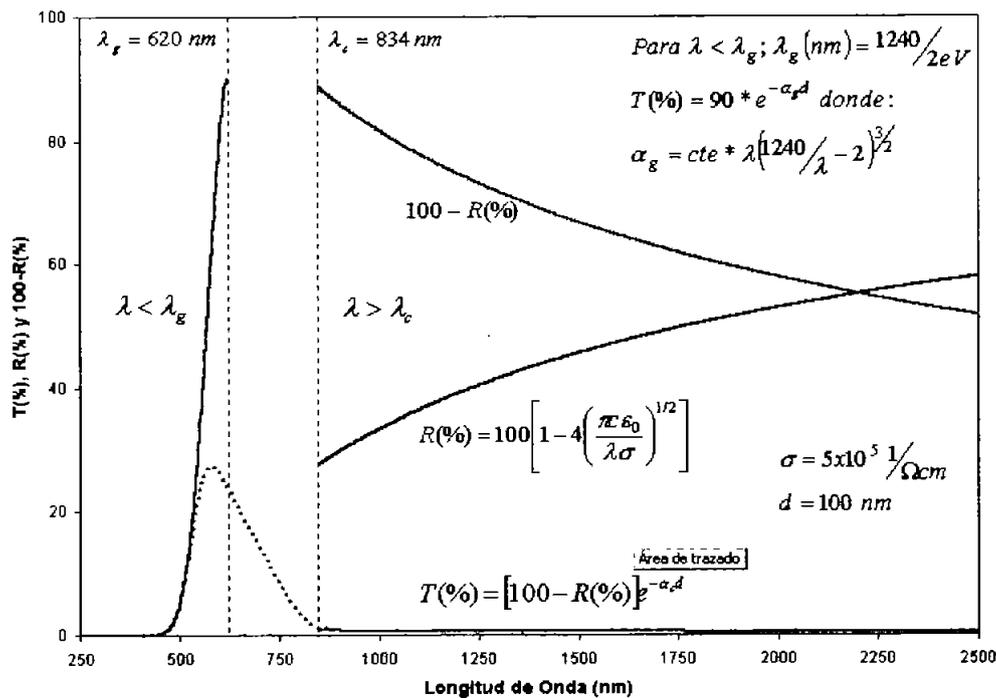
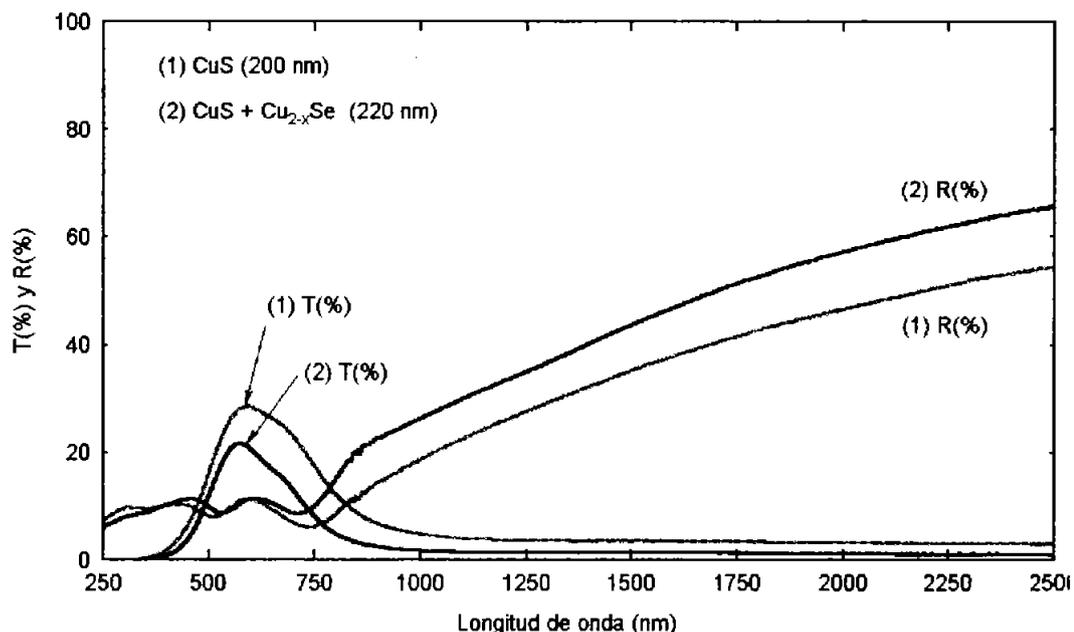


Figura 2.19 Propagación de la radiación electromagnética en un medio parcialmente conductor y que es un semiconductor.

Así, para una incidencia normal en el lado de la película de un vidrio sin laminar, se observa una alta reflectancia especular y una baja transmitancia óptica en regiones de

longitud de onda larga (a partir de 850 nm). La Figura 2.20 muestra este efecto, el cual produce un pico en la transmitancia en el intervalo de 500 a 600 nm. Esto proporciona una iluminación amarillo verdosa en el interior de la habitación cuando se instala este vidrio en ventanas. La región espectral mencionada anteriormente está en la parte central de la región del visible, donde el ojo humano tiene la máxima sensibilidad (a 565 nm) para una visión diurna [12]. Los parámetros de control solar de éstas películas se muestran en la Tabla 2.9.



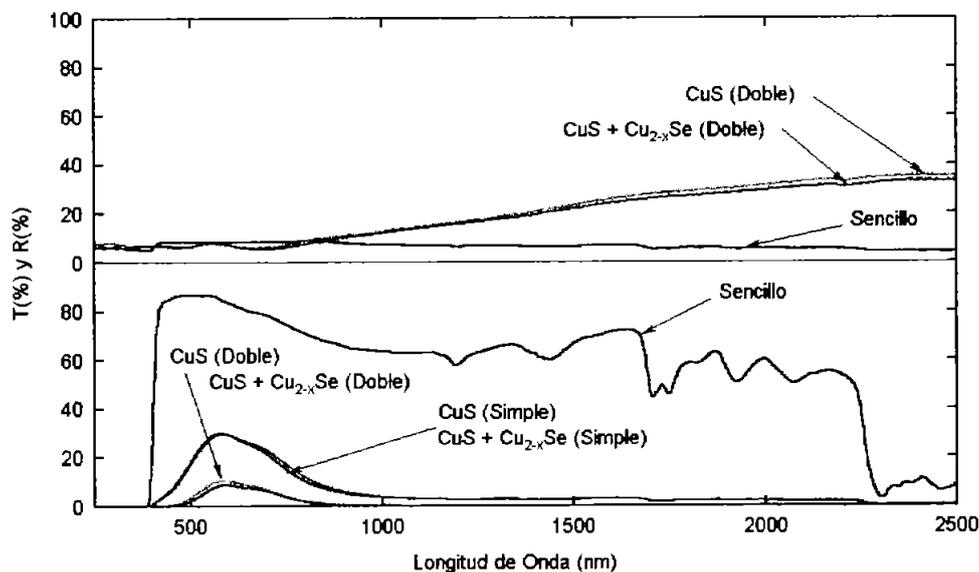
**Figura 2.20** Transmitancia (%) y Reflectancia (%) de películas delgadas de CuS y CuS-Cu<sub>2-x</sub>Se depositadas sobre vidrio, sin laminar. Antes de medir las películas, se hornearon en nitrógeno a 140°C por 30 minutos para simular el proceso térmico a que se someten en el proceso de laminación.

**Tabla 2.9** Parámetros de control solar de las PDS mostradas en la Figura 2.22

PDS	R <sub>UV</sub>	R <sub>VIS</sub>	R <sub>IR</sub>	T <sub>UV</sub>	T <sub>VIS</sub>	T <sub>IR</sub>	T <sub>TOT</sub>	R <sub>TOT</sub>	A%
CuS (200 nm)	9.8	9.6	21.0	0.9	20.4	8.1	13	16	71
CuS+Cu <sub>2-x</sub> Se (220 nm)	9.4	10.3	28.3	0.4	14.3	3.4	8	20	72

Estos parámetros ópticos son de relevancia práctica limitada porque las PDS no son estables durante periodos prolongados de tiempo sin un mecanismo de protección. Se propone el proceso de laminación para asegurar estabilidad al medio ambiente, al mismo tiempo que se ofrece un envidriado de seguridad espectralmente selectivo.

Las PDS mencionadas anteriormente se laminaron en configuración simple (S) y doble (D), (Figura 2.10), así como también se laminó un vidrio sencillo (vidrio / PVB / vidrio) como referencia. La Figura 2.21 muestra los espectros de transmitancia y reflectancia de estos vidrios. Las ondulaciones en la curva de transmitancia del vidrio simple en la región de 1000 a 2500 nm se deben a bandas de absorción óptica características del PVB. La reflectancia óptica del vidrio laminado sencillo es aproximadamente del 4% en la región espectral infrarroja, típico de una hoja de vidrio monolítico de sosa cal con índice de refracción de 1.52.



**Figura 2.21** Transmitancia (%) y Reflectancia (%) de PDS de CuS y CuS-Cu<sub>2-x</sub>Se laminadas.

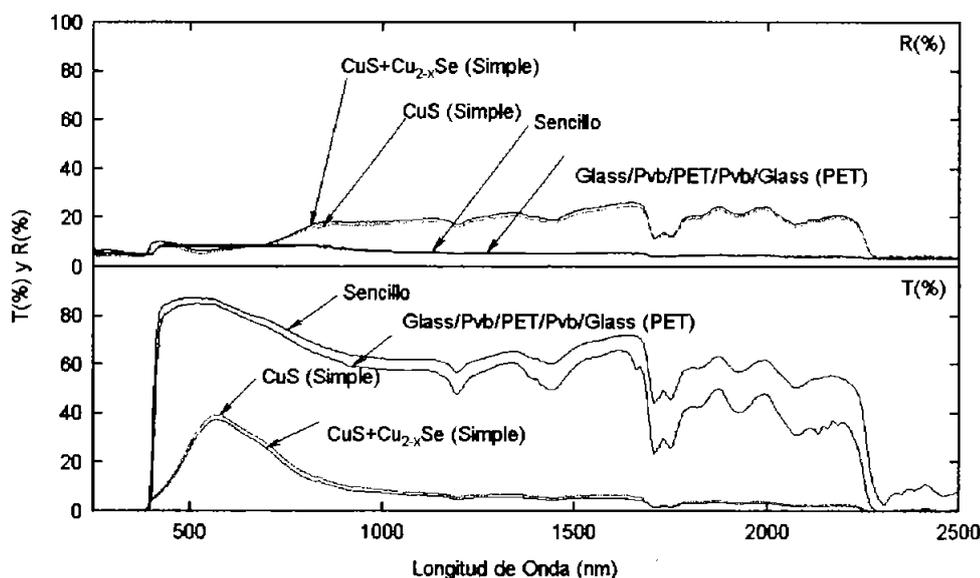
Hay una reducción considerable de la reflectancia en longitudes de onda larga, de cerca del 60% para películas conductivas (Figura 2.20) al 35% (Figura 2.21), a causa de la hoja de vidrio intermedia. Las características ópticas de los vidrios laminados mostrados en la Figura 2.20 se utilizaron para calcular los parámetros ópticos presentados en la Tabla 2.10. Las condiciones de la pruebas fueron con incidencia normal (5° de ángulo de incidencia) en el lado marcado con EXT en la Figura 2.10. La adición de una película de Cu<sub>2-x</sub>Se sobre el CuS, asegura la estabilidad química de ésta última antes de que se lleve a cabo el proceso de pre-laminación. En ausencia de ésta película, la pre-laminación se debe realizar antes de que transcurran 24 h después de haber

depositado la película de CuS. La estabilidad térmica del  $\text{Cu}_{2-x}\text{Se}$  ya ha sido descrita en trabajos anteriores [13].

**Tabla 2.10** Parámetros ópticos de los vidrios laminados mostrados en la figura 2.23.

PDS	$R_{UV}$	$R_{VIS}$	$R_{IR}$	$T_{UV}$	$T_{VIS}$	$T_{IR}$	$T_{TOT}$	$R_{TOT}$	A
CuS (200 nm) L Doble (D)	6.9	7.1	16.0	0.0	6.0	1.2	3	12	85
CuS+Cu <sub>2-x</sub> Se (220 nm) L Doble (D)	7.8	7.9	13.5	0.0	5.0	1.1	3	11	86
CuS (200 nm) L Simple (S)	6.4	6.5	13.7	0.0	20.7	12.7	13	10	77
CuS+Cu <sub>2-x</sub> Se (220 nm) L Simple (S)	5.2	5.8	14.6	0.0	21.0	12.4	12	11	77
Sencillo (3mm glass)	5.3	8.2	7.3	2.9	82.5	70.6	71	7	22

Las PDS descritas anteriormente también se pueden depositar sobre sustratos de PET, manteniendo sus características ópticas en los *avilcrasol*, como se muestra en la Figura 2.22. Sin embargo se espera que se modifique la adhesión interfacial entre la PDS y el PVB, aspecto que se evaluará en el Capítulo 4.



**Figura 2.22** Transmitancia (%) y Reflectancia (%) de vidrios laminados que incorporan películas de CuS y  $\text{CuS-Cu}_{2-x}\text{Se}$  depositadas sobre PET.

El propósito de depositar las PDS de CuS o  $\text{CuS-Cu}_{2-x}\text{Se}$  sobre hojas de PET y después laminarlas (configuración PET, Figura 2.10) es para reducir el riesgo de rompimiento de vidrios durante el proceso de lavado de los mismos, depósito por lotes y limpieza post depósito. Es viable depositar las PDS sobre PET en un proceso continuo

rollo a rollo, es decir, se coloca un rollo de PET sin depositar al inicio del proceso, se hace pasar automáticamente por unos depósitos que contienen el baño químico a una temperatura controlada y durante un tiempo específico. Al final el PET depositado se enrolla nuevamente quedando listo para ser utilizado en la fabricación de vidrios laminados. La Tabla 2.11 muestra las características ópticas de los vidrios laminados presentados en la Figura 2.22.

La absorción óptica en los vidrios laminados con PET recubierto es del 69% y el coeficiente de sombreado de 0.48. Sin la película de CuS, el coeficiente de sombreado es aproximadamente 0.8 con y sin PET. El coeficiente de sombreado se mejora siendo casi 0.5 con una transmitancia integrada en la región del visible de 27-29%, la cuál reduce la ganancia de calor al interior.

**Tabla 2.11** Parámetros de control solar estimados, para los vidrios laminados mostrados en la figura 2.24.

PDS	R <sub>UV</sub>	R <sub>vis</sub>	R <sub>IR</sub>	T <sub>UV</sub>	T <sub>vis</sub>	T <sub>IR</sub>	T <sub>TOT</sub>	R <sub>TOT</sub>	A
CuS PET 4h	4.8	7.2	16.4	0.8	28.8	11.1	18	12	70
CuS+Cu <sub>2-x</sub> Se PET 4h	5.5	8.1	17.5	0.7	27.1	9.8	17	13	70
PET simple (without film)	4.1	8.2	6.7	1.1	80.0	58.8	66	7	27
Simple (3mm glass)	5.5	8.9	7.0	2.8	83.1	64.7	71	8	21

## 2.5 Medición de la Resistencia Adhesiva de los Avilcrasol

Para cuantificar la resistencia adhesiva de los *avilcrasol* se llevaron a cabo pruebas experimentales de adhesión. Las mediciones se realizaron en el laboratorio mecánico de la Gerencia de Materiales y Procesos Químicos del Instituto de Investigaciones Eléctricas. Es en éste laboratorio donde se realizan pruebas de adhesión a vidrios laminados producidos por Sekurit México y Sekisui S-Lec de México; la primera, fabricante de vidrio laminado para la industria automotriz y la segunda empresa fabrica el PVB. Ambas requieren conocer la resistencia adhesiva de sus productos para el aseguramiento de calidad de su producto final. Se cuenta con la infraestructura necesaria para llevar a cabo las pruebas antes mencionadas, razón fundamental para elegir este tipo de análisis para la evaluación de la resistencia adhesiva de los *avilcrasol*.

El método de resistencia adhesiva por corte compresivo se describió en el apartado 1.3.8, donde al dispositivo mostrado en la Figura 2.23 se le aplica una fuerza vertical. Debido a la geometría del **Dispositivo para pruebas de adhesión (Disprad)**, esta fuerza vertical se descompone en una fuerza de compresión y otra de corte (cizalladura). La nucleación de la fractura en la interfase vidrio / PVB se inicia cuando bajo condiciones controladas de carga, la adhesión llega a su nivel más bajo, y se propaga inestablemente hasta que ocurre una caída abrupta de la carga (fuerza). Las Figuras 2.24 a, b, c, d y e muestran el crecimiento de la fractura (o delaminación) en la interfase vidrio / PVB hasta que ocurre la falla del laminado (figura e).

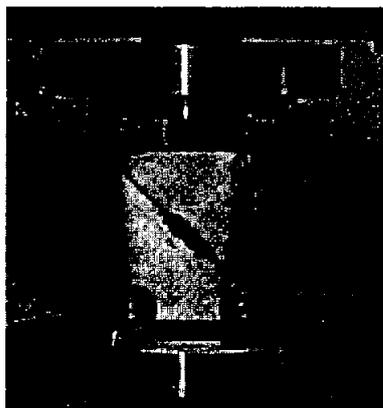


Figura 2.23 Dispositivo para pruebas de adhesión

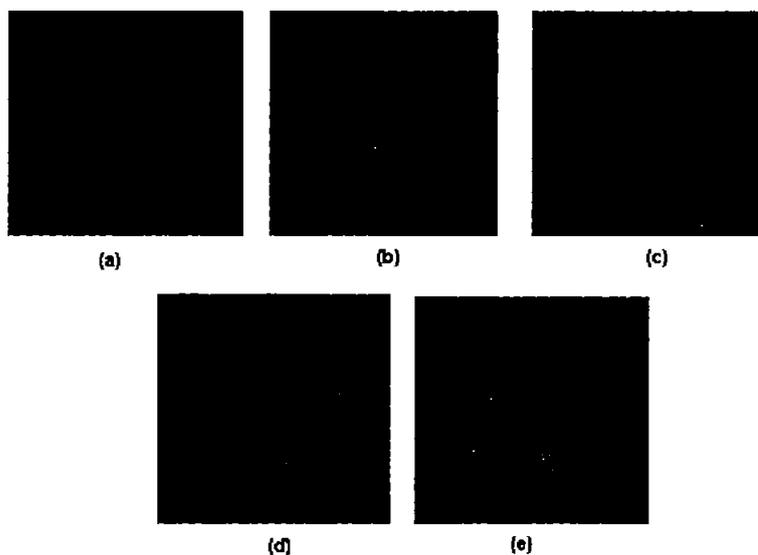
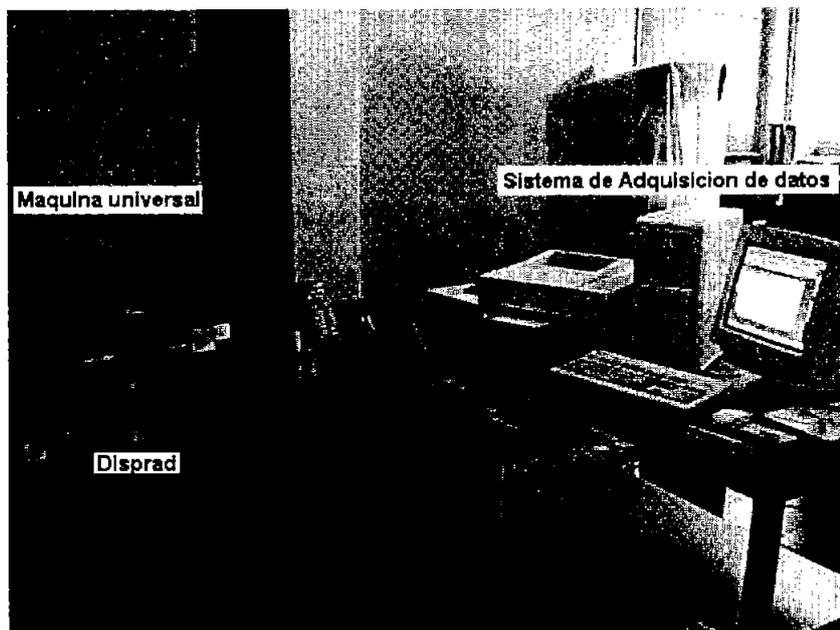


Figura 2.24 Secuencia de una prueba de adhesión a un vidrio laminado

Se utiliza una máquina universal Instron 5500 R con capacidad de diez toneladas para llevar a cabo las pruebas de adhesión. Los datos de la carga aplicada en el tiempo se graban mediante un software para adquisición de datos llamado Merlín, proporcionado por el fabricante de la máquina universal. La Figura 2.25 muestra el *Disprad*, la máquina universal y el sistema de adquisición de datos para llevar a cabo las pruebas de adhesión. La Figura 2.26 muestra el gráfico que aparece en la pantalla del sistema de adquisición de datos, durante el ensayo de adhesión. Las pruebas corresponden a cinco probetas obtenidas de un *avilcrasol*.



**Figura 2.25** Disprad, máquina universal y sistema de adquisición de datos para llevar a cabo pruebas de adhesión.

En el eje de las abscisas se tiene el tiempo que dura la prueba en segundos, y en las ordenadas la fuerza aplicada a la probeta en kgf. La fuerza máxima soportada por el laminado se utiliza para caracterizar la adhesión, al dividir ésta entre el área de la probeta, se obtiene el esfuerzo cortante (cizalladura) máximo al que ocurre la falla.

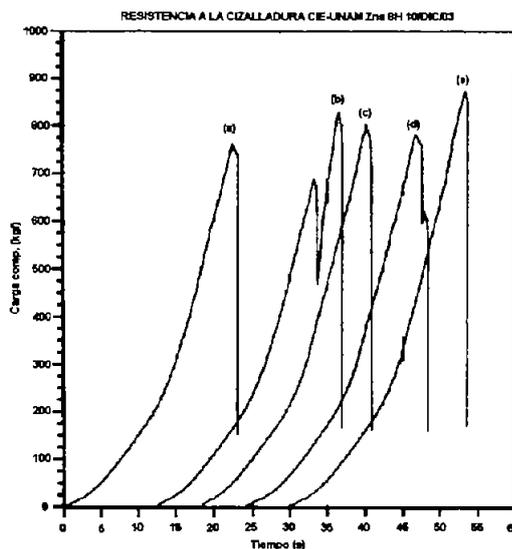


Figura 2.26 Curvas características de las pruebas de adhesión por corte compresivo.

De la Figura 2.26 se puede observar que la curva (b) presenta dos picos característicos, esto se debe a que durante el ensayo, la probeta se fracturaba partiéndose en dos, una de las partes cedía primero (primer pico) ante la carga aplicada. Al ceder una de las mitades del laminado se presenta una caída instantánea en la fuerza aplicada, pero como la otra mitad del laminado no falla aún, la carga nuevamente se eleva hasta alcanzar un valor máximo (segundo pico) después del cuál cae súbitamente. Este último valor es el que se utiliza para caracterizar la resistencia adhesiva de esa probeta en particular. El valor máximo de cada una de las cinco probetas ensayadas se promedia para obtener el valor de resistencia adhesiva característico del *avilcrasol*. La desviación estándar de estas mediciones no debe ser mayor a  $\pm 1$  MPa. En los capítulos siguientes, por brevedad se presentaran sólo los valores promedio del esfuerzo cortante máximo así como sus barras de error (o desviación estándar) de cada una de las seis probetas de un *avilcrasol* en particular.

## 2.6 Pruebas de Impacto a los *Avilcrasol*

En el Capítulo 1 se mencionó que las principales causas del rompimiento de los vidrios de las edificaciones, son las cargas de vientos y el impacto de proyectiles contenidos en el viento durante una tormenta o huracán. La adhesión de los vidrios es de vital

importancia en el comportamiento al impacto en un vidrio laminado. Si el laminado tiene una adhesión muy alta (más de 10 MPa) disipará sólo una pequeña parte de la energía cinética del proyectil, comportándose como un panel rígido. Por el contrario, si la adhesión es muy baja (menos de 5 MPa) se corre el riesgo de desprendimiento de los fragmentos de vidrio del PVB y por consiguiente daños personales o al inmueble [14]. Se pretendía correlacionar la resistencia adhesiva de los *avilcrasol* con el impacto de pequeños proyectiles a baja velocidad, pero dada la magnitud de ésta investigación, solo se realizaron pruebas preliminares de impacto.

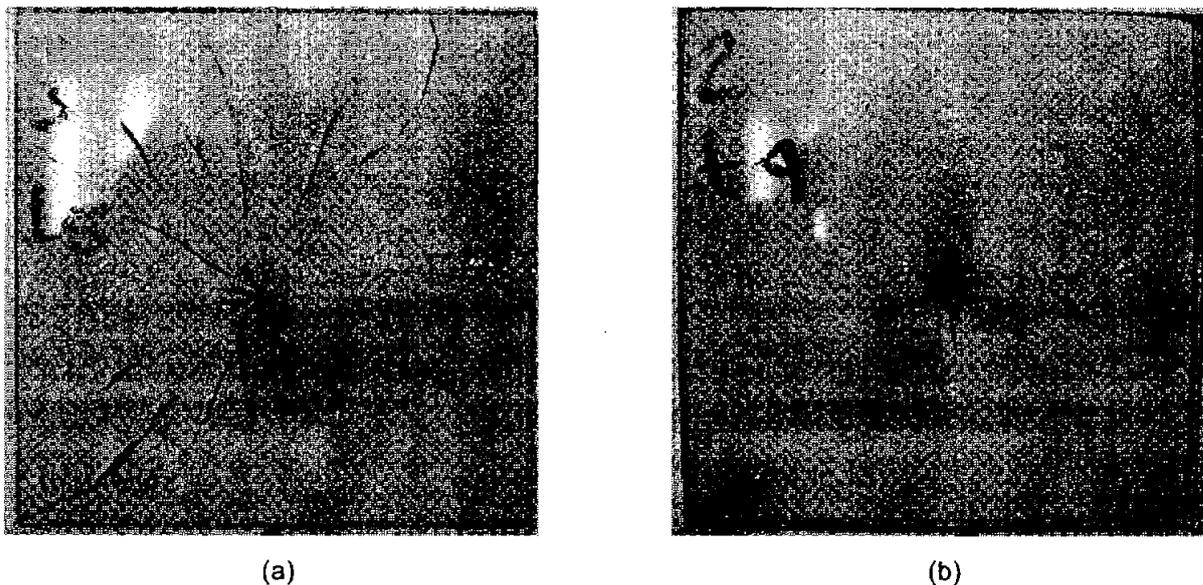
Para llevar a cabo las pruebas preliminares de impacto a los *avilcrasol*, se diseñó una pistola de aire durante una estancia en el Departamento de Ingeniería Aeroespacial de la Universidad de Texas en Austin en el verano del 2002. Fue en ésta Universidad donde se realizaron las pruebas de impacto, en el apéndice C se presenta el diseño de la pistola de aire. Las dimensiones del proyectil fueron de 8 mm de diámetro y 9 mm de longitud, con una masa de 2.2 g. Las condiciones del experimento fueron tomadas de [15-19], con el propósito de tener patrones de comparación. La velocidad de la bala se midió con dos sensores láser, los cuales se instrumentaron a un osciloscopio. Éstos se instalaron a la salida del cañón de la pistola, a una distancia determinada (1 m aprox.) y con ellos se pudo medir el tiempo que tarda la bala en cruzarlos. La velocidad del proyectil se calculó con la distancia entre sensores y el tiempo medido. Las velocidades utilizadas en estas pruebas fueron de 35 y 45 m/s (126 y 162 km/h).

La pistola de aire diseñada en la Universidad de Texas en Austin, se implementó en el CIE-UNAM. La instrumentación y calibración de la misma para medir la velocidad del proyectil que impacta el vidrio laminado, fue parte del proyecto de investigación de Téllez [20], para obtener el grado de Ingeniero Electromecánico.

### **2.6.1 Características de la Prueba de Impacto**

La dimensión de los *avilcrasol* utilizados fue de 100 mm x 100 mm y se fijaron en un marco de aluminio con empaques de silicón en la periferia. La distancia del cañón de la pistola al marco de aluminio fue de aproximadamente 1 metro. Se utilizaron dos tipos de

*avilcrasol*, uno con la configuración de un vidrio laminado sencillo (vidrio 3mm / PVB / vidrio 3mm) y otro con la configuración PET (vidrio 3mm / PVB / PET / PVB / vidrio 3mm). Se inició primeramente con una velocidad de impacto de 35 m/s y posteriormente su incrementó a 45 m/s. La Figura 2.27 muestra dos *avilcrasol* impactados con la primera velocidad; se observa que el comportamiento mecánico de los *avilcrasol* es completamente diferente.



**Figura 2.27** Tipo de fractura de dos configuraciones diferentes de *avilcrasol*, (a) sencillo y (b) PET.  
Velocidad de impacto 35 m/s.

En el *avilcrasol* sencillo se aprecia una absorción de energía mayor que en el que integra PET, manifestándose en el tipo de fractura radial que presenta. Esta velocidad de impacto no es crítica para un *avilcrasol*, ya que el vidrio se fractura pero permanece íntegro en el marco de aluminio. Un dato importante de mencionar es que en ambos casos, sólo se fracturó un vidrio de los dos que componen el laminado. En el caso del *avilcrasol* sencillo, se fracturó el vidrio contrario a la zona de impacto, y en otro caso (PET) se fracturó el vidrio donde impactó el proyectil. La Figura 2.28 muestra las fotografías de la sección transversal de los *avilcrasol* mencionados anteriormente. Las líneas indican el efecto causado por el impacto, es decir, la fractura del vidrio, que aparecen como zonas oscuras. Se muestra además, el lugar de impacto del proyectil, representado por una bala en la Figura 2.28.

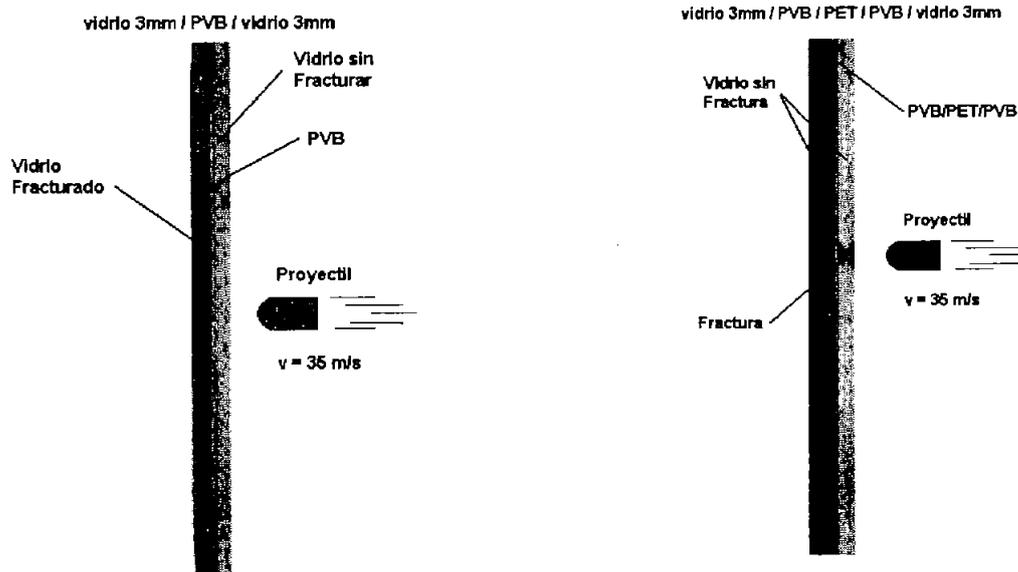
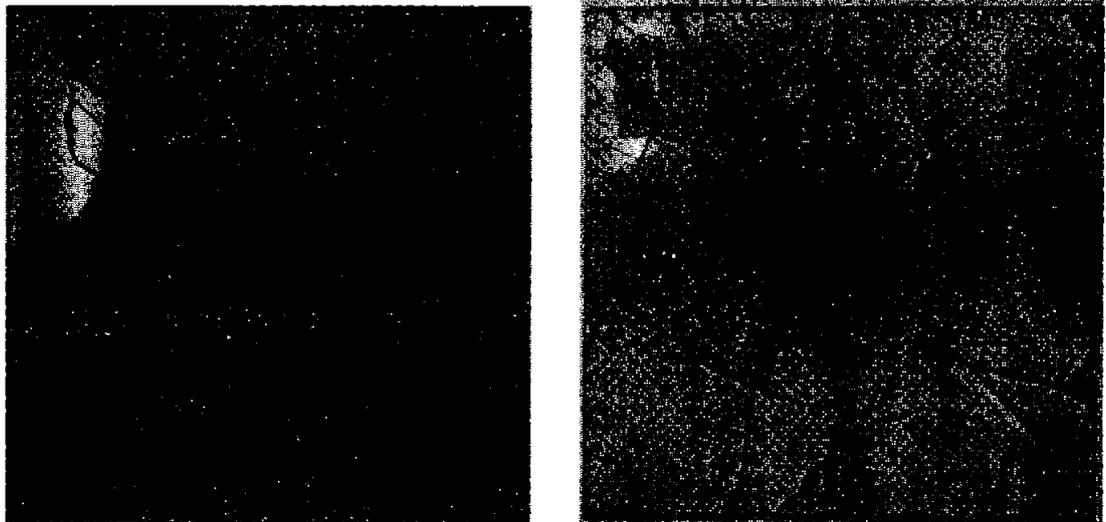


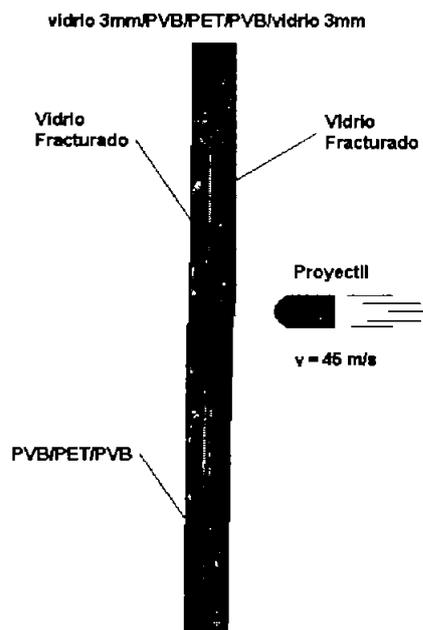
Figura 2.28 Sección transversal de los *avilcrasol* impactados con un proyectil de 2.2 g a 35 m/s (126 km/h)

De acuerdo al criterio de diseño de *la hoja de sacrificio* [21], el vidrio exterior es el que se debe fracturar, permaneciendo el vidrio interior íntegro para soportar las cargas de viento ocasionadas por el huracán. El *avilcrasol* en configuración PET cumple el criterio anterior; sin embargo, el *avilcrasol* en configuración sencilla, aunque se fractura el vidrio interior, el exterior queda íntegro para soportar las cargas de viento.

La Figura 2.29 muestra los mismos tipos de *avilcrasol* anteriores, pero ahora con impactos del mismo proyectil a 45 m/s (162 km/h). Se observa que a esta velocidad ambos vidrios se fracturan completamente, a causa de la magnitud del impacto. La figura 2.30 muestra la sección transversal de un *avilcrasol* sometido a este tipo de impacto.



**Figura 2.29** Tipo de fractura de dos configuraciones diferentes de *avilcrasol*, (a) sencillo y (b) PET. Velocidad de impacto 45 m/s (162 km/h).



**Figura 2.30** Sección transversal de un *avilcrasol* impactado con un proyectil de 2.2 g a 45 m/s (162 km/h)

Pocas veces un huracán alcanza una magnitud como ésta (162 km/h), sin embargo, es posible que este tipo de vidrios soporten las cargas de viento si se cuenta con un anclaje adecuado. Para proporcionar seguridad ante un fenómeno climatológico de éstas dimensiones, es necesario trabajar con diferentes configuraciones de vidrio, por ejemplo, utilizar vidrios de 3 mm de espesor en el exterior y 4 mm en el interior y una

hoja de PVB de 1.56 mm de espesor. Se pueden utilizar además diferentes tipos de vidrios, como pueden ser los termo-endurecidos o templados, que tiene una resistencia de 2 a 4 veces mayor que un vidrio monolítico (recocido) convencional.

## 2.7 Conclusiones

En éste Capítulo se presenta el desarrollo experimental para la obtención de los *avilcrasol*, desde el procedimiento de limpieza de las hojas de vidrio que lo componen, la preparación de las soluciones químicas, el proceso de laminación y las pruebas preliminares de impacto. En los Capítulos precedentes, 3 y 4, se presenta la caracterización óptica y mecánica de los *avilcrasol* en diferentes configuraciones, los cuales fueron obtenidos siguiendo el desarrollo experimental presentado en éste Capítulo.

Respecto a los resultados de las pruebas de impacto a vidrios laminados realizadas en UT Austin, éstos no pretenden proporcionar alguna base para la selección de vidrios laminados en regiones expuestas a huracanes o tormentas tropicales, ya que sólo se realizaron 10 pruebas y éstos no contaban con películas delgadas semiconductoras. Se requieren estudios sistemáticos para correlacionar la resistencia adhesiva de los *avilcrasol* con el comportamiento al impacto. De hecho, en el Capítulo I se hace referencia a distintos estudios de impacto de pequeños proyectiles a vidrios laminados; sin embargo, ningún estudio contempla los vidrios laminados con películas de control solar y la influencia que tienen éstas en la resistencia adhesiva y al impacto.

## BIBLIOGRAFÍA

1. Fernandez A and Nair P K; **Characteristics of metal chalcogenide solar control films with a protective polymer coating**, *Thin Solid Films*, **204** (1991)459.
2. Huang L, Nair P K, Nair M T S, Zingaro R A and Meyers E, **Interfacial diffusion of metal atoms during air annealing of chemically deposited ZnS-CuS and PbS-CuS thin films**, *J. Electrochem. Soc.* **141**(1994)2536.

3. Arenas, O L, Nair M T S and Nair P K, **Chemical bath deposition of ZnS thin films and modifications by air annealing**, *Semicond. Sci. Technol.* **12** (1997)1323.
4. Huang L, Zingaro R A, Meyers E A, Nair P K and Nair M T S, **Chemical deposition of thin films of copper sulfide on glass surfaces modified with organosilanes**, *Phosphorus, Sulfur and Silicon*, 105 (1995)175.
5. López Mata C, **Modificaciones de las superficies de los sustratos para el mejoramiento de la adhesión de películas delgadas semiconductoras para su uso en los dispositivos de conversión de energía solar y de ahorro de energía**, *Tesis de Maestría*, Instituto Tecnológico de Cd. Madero, marzo de 2003.
6. García V M, **Superficies selectivas de sulfuros metálicos químicamente depositados para aplicaciones solares**, *Tesis de Maestría*, Universidad Nacional Autónoma de México, (1991) p42.
7. [www.trosifol.com/index1024.html](http://www.trosifol.com/index1024.html)
8. Nair P K García V M, Fernandez A M, Ruiz H S and Nair M T S, **Optimization of chemically deposited  $Cu_xS$  solar control coatings**, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **24**(1991) 441.
9. Nair M T S and Nair P K, **Chemically deposited ZnS thin films: application as substrate for chemically deposited  $Bi_2S_3$ ,  $Cu_xS$  and PbS thin films**, *Semicond. Sci. Technol.* **7**(1992) 239.
10. García S V M, Películas delgadas de selenuros de metales (Bi, Cd, Cu y Zn) por depósito químico y tratamientos postdepósito para aplicaciones fotovoltaicas, *tesis de doctorado*, UNAM (1998).
11. Cascone E, David D J, Di Lorenzo M L, Karasz F E, Martuscell E and Raimo M, **Blends of polypropylene with poly(vinyl butyral)**, *J. of Appl. Polymer Sci.* **82** (2001)2934.
12. Pritchard D C, *Lighting*, 2<sup>da</sup> ed. London : Longman, 1978.
13. V. M. Garcia, P. K. Nair and M. T. S. Nair, **Copper selenide thin films by chemical bath deposition**, *J. Crystal Growth*, **203**, (1999)113.
14. Sekurit Saint Gobaint Glass, **SSGG**, Departamento de Aseguramiento de Calidad.

15. Bher R A and Kremer P A, **Performance of Laminated Glass Units Under Simulated Windborne Debris Impacts**, *J. of Architectural Engineering*, **2**, No. 3 (1996)95.
16. Flocker F W and Dharani L R, **Modelling Fracture in Laminated Architectural Glass Subject to Low Velocity Impact**, *J. of Materials Science*, **32** (1997) 2587.
17. Ji F S, Dharani L R and Bher R A, **Damage Probability in Laminated Glass Subjected to Low Velocity Small Missile Impacts**, *J. of Materials Science*, **33** (1998)4775.
18. Bher R A, Kremer P A, Dharani L R, Ji F S and Kaiser N D, **Dynamic Strains in Architectural Laminated Glass Subjected to Low Velocity Impacts from Small Projectiles**, *J. of Mat. Sci.*, **34** (1999)5749.
19. Saxe T J, Bher R A, Minor J E, Kremer P A and Dharani L R, **Effects of Missile Size and Glass Type on Impact Resistance of Sacrificial Ply Laminated Glass**, *J. of Architectural Engineering*, **8**, No.1 (2002)24.
20. Téllez A F, **Instrumentación electrónica de una autoclave para la fabricación y pruebas de impacto sobre vidrios laminados**, *Tesis de Licenciatura*, Instituto Tecnológico de Zacatepec, abril 2004.
21. Kaiser N D, Bher R A, Minor J E, Dharani L R, and Kremer P A, **Impact Resistance of Laminated Glass Using Sacrificial Ply Design Concept**, *J. of Architectural Engineering*, **6**, No. 1 (2000)24.

## CAPÍTULO 3

### **AVILCRASOL CON PELÍCULAS DELGADAS SEMICONDUCTORAS DE ZnS, CuS, ZnS-CuS, Y ZnS-CuS-Cu<sub>2-x</sub>Se SOBRE VIDRIO**

En este capítulo se presentan los resultados de la caracterización óptica-solar y mecánica de los vidrios laminados con recubrimientos controladores de la radiación solar. Se siguió el procedimiento descrito en el capítulo anterior para las mediciones ópticas de los *avilcrasol*. Los parámetros de control de la radiación solar se evaluaron de acuerdo a la norma ISO 9050:2003. Se presenta además la caracterización mecánica mediante la prueba de resistencia adhesiva descrita en el capítulo anterior, aspecto que se estudia por primera vez a través de ésta investigación. Los resultados anteriores se utilizan para proponer criterios de selección de vidrios laminados con PDS según sea la ubicación geográfica de aplicación, que ofrezcan protección contra fenómenos climatológicos como huracanes y tormentas tropicales, además de reducir la carga térmica al interior de la edificación, logrando con ello un ahorro de energía.

### 3.1 Generalidades

Como se ha mencionado anteriormente, la adhesión vidrio / PVB juega un papel muy importante en la absorción de energía de un vidrio laminado. Por ejemplo, al incrementar la adhesión se reduce la cantidad de polímero disponible para participar en la deformación, lo cual reduce la capacidad de absorber la energía del impacto [1]. Una forma efectiva de mejorar la adhesión es incorporando ~ 0.1% w/w de acetato de potasio en las hojas de PVB, ya que la deliquesencia de las sales de potasio dan lugar a soluciones en equilibrio con el agua en el PVB [2]. Además, la humedad relativa (HR%) es un factor muy importante en el comportamiento de la adhesión y de aquí que se deba controlar durante el proceso de laminación; si la HR aumenta, la adhesión disminuye. Se ha reportado [3] que los tratamientos termoquímicos con soluciones acuosas de urea a temperaturas de 140 a 160°C, aplicados al vidrio flotado, incrementan las propiedades de adhesión de éste al PVB hasta en un 50%, comparado con vidrios sin tratamiento.

Se ha encontrado que las películas delgadas de sulfuro de zinc (ZnS) mejoran la adhesión entre el vidrio y otras películas delgadas semiconductoras (PDS): la presencia del ZnS sobre los sustratos de vidrio soluciona los problemas de baja adhesión (peeling) de películas delgadas de  $\text{Bi}_2\text{S}_3$  y CuS cuando se depositan directamente sobre vidrio [4-6]. Estudios de espectroscopia de rayos X (XPS) han mostrado que este mejoramiento en la adhesión ocurre a causa de la penetración de átomos de zinc al sustrato de vidrio [5]. El horneado en aire de las películas de ZnS a temperaturas cercanas a 380°C causarán su conversión parcial a óxido de zinc (ZnO) [6]. Con una brecha de energía óptica de 3.4 a 3.7 eV de las películas de ZnO o ZnS, los sustratos permanecerán transparentes en la región del visible.

La presencia de una película delgada de ZnS de 40 a 80 nm de espesor aplicada por la técnica de depósito por baño químico (CBD) al sustrato de vidrio mejora la adhesión del vidrio laminado en aproximadamente un 20% sin modificar las propiedades ópticas. Pero, cuando una PDS de CuS con espesor de 80 a 120 nm se añade a la película de

ZnS, proporcionan propiedades de control de la radiación solar al vidrio laminado, sin perjudicar la adhesión. Para cuantificar el mejoramiento de la adhesión del ZnS se llevaron a cabo pruebas de resistencia adhesiva de vidrios laminados con y sin películas de ZnS. Además, para determinar la diferencia existente entre usar el lado aire y lado estaño de un vidrio flotado para la fabricación de vidrios laminados, se realizaron también las pruebas de resistencia adhesiva.

## **3.2. Depósito Químico de Películas Delgadas de ZnS-CuS y CuS**

### **3.2.1 Depósito Químico de Películas Delgadas de ZnS**

Se depositaron PDS de ZnS con espesores de 40 a 60 nm aproximadamente, sobre sustratos de vidrio de 2 mm de espesor y área de 10 x 12.5 cm<sup>2</sup>, los cuales se lavaron con jabón neutro y fueron enjuagados con agua destilada y finalmente secados con aire caliente. El lado aire del vidrio flotado, se detectó utilizando una lámpara de luz ultravioleta – este lado produce relativamente menos brillo fluorescente. La micro-rugosidad de éste lado produce mejor adherencia en el vidrio laminado [7]. Las hojas de vidrio se colocaron horizontalmente con el lado aire y el lado estaño en contacto con la solución del baño químico contenido en una charola. La composición del baño y las condiciones del depósito se presentan en el apartado 2.1.3. Los sustratos fueron removidos después de 4, 6 y 8 h, con la temperatura del baño mantenida a 25° C.

El espesor de las películas se midió utilizando un perfilómetro Alpha-Step (Tencor Instruments, CA) y fueron de 40, 60 y 80 nm aproximadamente para 4, 6 y 8 h respectivamente. En cada caso, las muestras se hornearon a 400°C por 30 minutos en un horno con atmósfera de aire, para convertir la superficie de la película a óxido [6], con el propósito de estudiar cómo afecta esto a la adhesión del vidrio laminado.

### **3.2.2 Depósito Químico de Películas Delgadas de CuS**

Las PDS de CuS se depositaron directamente sobre el lado aire de hojas de vidrio claro de 2 mm de espesor, los cuales fueron colocados horizontalmente, en la misma forma en que se depositaron las películas de ZnS, la composición del baño y las condiciones

del depósito se presentan en 2.1.5. Las hojas de vidrio fueron soportadas por tiras de vidrio de 3 mm de espesor colocadas dentro de la charola que contenía el baño químico. La duración del depósito químico de estas películas fue de 4 y 6 h a temperatura ambiente. Los sustratos fueron removidos, enjuagados con agua y secados con aire caliente. El espesor de las películas fue de aproximadamente 100 nm y 150 nm para el depósito de 4 y 6 h respectivamente. Se depositó también CuS sobre hojas de vidrio con ZnS depositado por 6h (60 nm) a temperatura ambiente, las cuales se utilizaron para estudiar la modificación de la adhesión en los vidrios laminados. El espesor total medido de las películas ZnS+CuS para el depósito de CuS por 4h fue de 150 nm y para el depósito de CuS por 6h fue de 200 nm aproximadamente.

### 3.2.3 Proceso de Laminación

a) *Tipo de arreglo para obtención del avilcrasol.* Se utilizaron diversos arreglos, como (i) vidrio/ZnS(ZnO)/PVB/(ZnO)ZnS/vidrio, para tener un patrón de comparación o referencia el arreglo (ii) vidrio/PVB/vidrio también se laminó. También se laminaron los arreglos (iii) vidrio-CuS/PVB/CuS-vidrio y (iv) vidrio-ZnS-CuS/PVB/CuS-ZnS-vidrio para establecer el papel que juegan las películas de ZnS en el mejoramiento de la adhesión de las películas delgadas de CuS. Se utilizaron hojas de PVB de 0.76 mm de espesor para unir los *avilcrasol*. La pre laminación de los *avilcrasol* se llevó a cabo en una bolsa de neopreno, aplicando vacío a temperatura ambiente por 6 minutos y posteriormente otros 6 minutos a 130°C, este procedimiento difiere un poco al descrito en el apartado 2.2 pero los resultados son los mismos. Una vez pre-laminados los *avilcrasol*, se midió su contenido de humedad y estos valores estuvieron en el intervalo de 0.3 a 0.5%, que son los valores recomendables para tener una buena adhesión en los laminados [8].

b) *Proceso de Laminación.* Todos los *avilcrasol* desarrollados en este trabajo fueron laminados en una autoclave a 135°C con una presión de 13 kg/cm<sup>2</sup> durante 30 minutos. Todo el proceso, que involucra el calentamiento, sostenido o tiempo de laminación a la presión y temperatura indicadas anteriormente, y el enfriamiento tiene una duración de dos horas aproximadamente. Para la caracterización óptica y mecánica los *avilcrasol* se cortaron en pequeñas piezas de 25 mm x 25 mm con una rueda de diamante. Todo el

proceso de laminación se llevó a cabo en los laboratorios de Sekisui S-Lec de México, empresa fabricante del polímero de laminación PVB, siguiendo las mismas condiciones que utilizan para el aseguramiento de calidad de su producto.

### 3.3 Caracterización

#### 3.3.1 Caracterización Óptica

La transmitancia óptica y la reflectancia especular con incidencia casi normal ( $5^\circ$ ) de los *avilcrasol* se midieron en un espectrofotómetro Shimadzu 3100 PC, con aire y un espejo de aluminio de primera superficie como referencias, respectivamente. Los parámetros de control solar, tales como la transmitancia integrada (T%), y la reflectancia (R%) para las regiones ultravioleta (UV, 300-380 nm), visible (VIS, 380-780 nm), cercano infrarrojo (CIR, 780-2500 nm), así como el rango espectral solar completo, (SOL, 300-2500 nm) y la absorbancia ( $A_{SOL}\%$ ) fueron evaluados para el espectro solar AM1.5 y D65 siguiendo el procedimiento descrito en el apartado 1.5.2.

#### 3.3.2 Pruebas de Adhesión

El método de prueba utilizado para evaluar la resistencia adhesiva de los *avilcrasol* se describe en el apéndice A. La Figura 3.1 muestra las interfaces involucradas de los *avilcrasol* utilizados en el trabajo que se presenta en éste Capítulo.

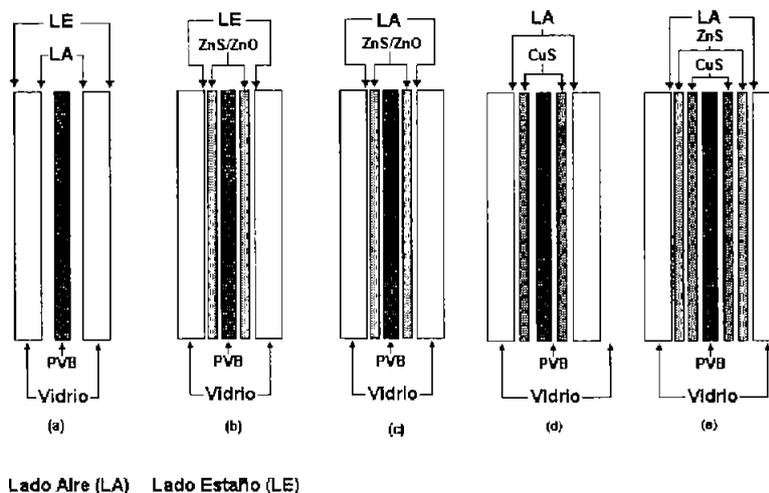


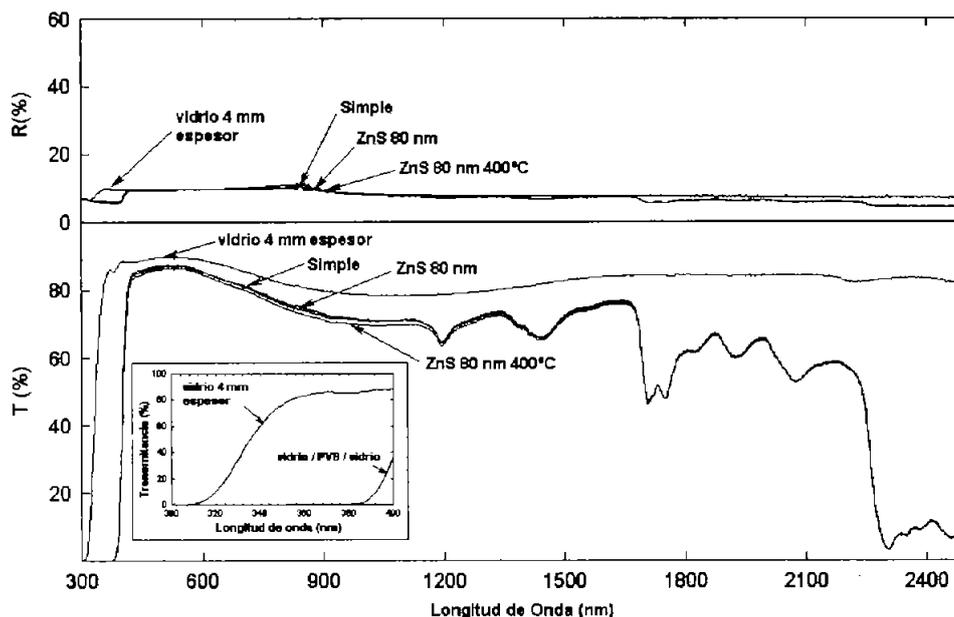
Figura 3.1 Tipos de *avilcrasol* utilizados para su evaluación óptica y mecánica

La prueba de adhesión se llevó a cabo a  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  y  $55 \pm 5\%$  de humedad relativa en el laboratorio mecánico de la Gerencia de Materiales y Procesos Químicos del Instituto de Investigaciones Eléctricas. Se utilizó una máquina universal Instron 5500 con capacidad de 10 000 kgf y la velocidad de la prueba fue de 6 mm/min y las mediciones de adhesión fueron grabadas mediante un sistema de adquisición de datos. La obtención de las probetas de cada *avilcrasol* se describe con detalle en el apartado 2.3.1. Solo se utilizaron 6 probetas de cada laminado, y éstas se cortaron de la parte central del mismo.

### 3.4 Resultados y Discusión

#### 3.4.1 Caracterización Óptica

La Figura 3.2 muestra la transmitancia óptica y la reflectancia especular de los vidrios laminados sin (Figura 3.1 (a)) o con películas delgadas de ZnS/ZnO (Figuras 3.1 (b) o (c)) comparadas con una hoja de vidrio de 4 mm de espesor. La presencia del PVB produce bandas de absorción en la región del cercano infrarrojo (NIR). No hay una diferencia significativa entre las propiedades ópticas de los *avilcrasol* con o sin películas delgadas de ZnS/ZnO. Esto es porque el inicio de la absorción óptica debido al ZnS (brecha de energía de material cristalino, 3.7 eV) o ZnO (brecha de energía de material cristalino, 3.4 eV) debería ser en el intervalo de 350 a 380 nm, siendo transparente a lo largo de las regiones del visible y cercano infrarrojo. El PVB usado para la fabricación de los *avilcrasol* tiene una alta absorción óptica en la región del ultravioleta, comparado con una hoja de vidrio claro (inserción en la Figura 3.2).



**Figura 3.2** Transmitancia óptica (T%) y Reflectancia óptica (R%), de un vidrio claro de 4 mm de espesor y vidrios laminados que incorporan películas de ZnS en el lado aire de un vidrio claro de 2 mm de espesor.

La reflectancia de todos los laminados es menor al 10% en toda la región espectral solar. La Tabla 3.1 muestra los parámetros ópticos de control solar de vidrios laminados con y sin películas delgadas de ZnS/ZnO, así como también de un vidrio claro de 4 mm de espesor. Estos parámetros se obtienen multiplicando los valores de la transmitancia óptica y la reflectancia especular por los valores de irradiancia espectral solar para una masa de aire particular (espectro solar D65) e integrándolos para diferentes regiones espectrales, como se describe en el apéndice A.

La reducción en la transmitancia en la región UV ( $T_{UV}$ ) en todo el vidrio laminado (< 0.04%) comparada con la de un vidrio claro de 4 mm de espesor (68%) es el aspecto más notable de los parámetros ópticos mostrados en la Tabla 3.1.

**Tabla 3.1** Parámetros de control solar en porcentaje de la transmitancia óptica (T), reflectancia especular (R) y absortancia (A) para las regiones (UV), visible (VIS), cercano infrarrojo (CIR) y toda la región espectral total (SOL) para vidrios laminados, utilizando diferentes tipos de películas delgadas, evaluados de acuerdo a D65.

Tipo de <i>avilcrasol</i>	T <sub>UV</sub>	R <sub>UV</sub>	T <sub>VIS</sub>	R <sub>VIS</sub>	T <sub>SOL</sub>	R <sub>SOL</sub>	A <sub>SOL</sub>	T <sub>NIR</sub>	R <sub>NIR</sub>
Vidrio 4 mm de espesor	68.5	9.0	89.4	9.5	84.2	9.2	6.6	80.8	8.5
Simple (vidrio/PVB/vidrio)	0.04	5.9	86.7	9.5	73.2	8.7	18.1	68.9	7.9
Vidrio/ZnS80nm/PVB/ZnS80nm/vidrio	0.05	6.3	86.4	9.6	73.7	8.8	17.5	69.0	8.0
Vidrio/ZnS80 nm/PVB/ZnS80nm/vidrio (with ZnO)	0.05	6.3	85.8	9.6	72.7	8.7	18.6	67.9	7.9
V/CuS 100 nm/PVB/ CuS 100 nm/V	0.002	8.8	39.6	10.6	22.0	11.7	66.3	11.6	13.9
V/ZnS-CuS100 nm/PVB/CuS100 nm-ZnS/V	0.001	8.9	36.3	11.5	19.4	12.8	67.8	9.3	15.6
V/CuS 150nm/PVB/ CuS 150 nm/V	0.001	7.3	22.0	7.8	9.9	13.0	77.1	3.0	19.6
V/ZnS-CuS150 nm/PVB/CuS150 nm-ZnS/V	0.001	7.5	22.8	8.1	10.2	13.4	76.4	3.3	20.3

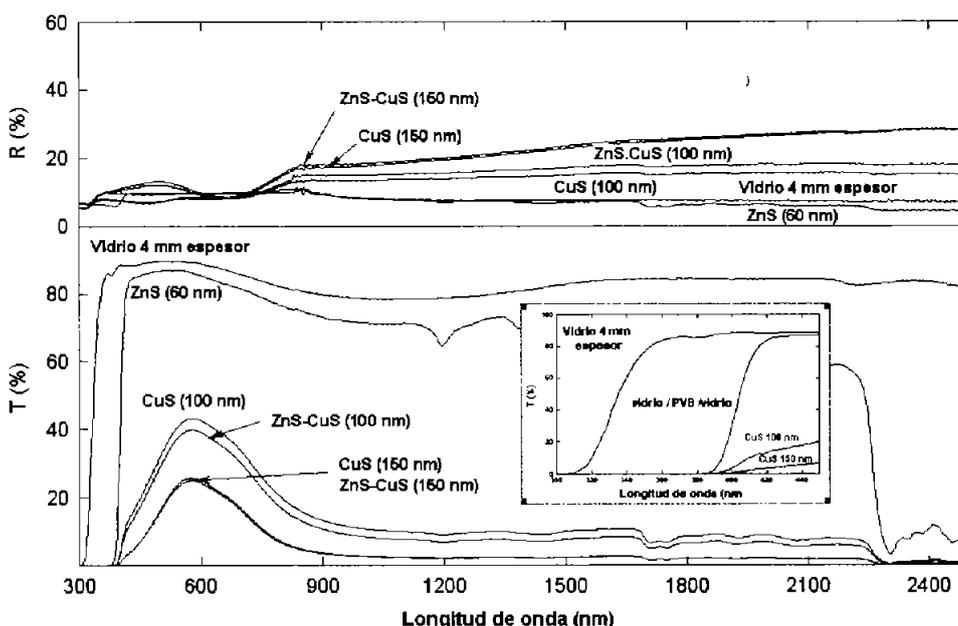
Esto es citado a menudo como una de las mayores ventajas de los vidrios laminados, ya que protegen del daño en la piel humana a causa de la radiación UV que atraviesa el vidrio claro, así como también reduce el deterioro de las superficies en el interior de las edificaciones.

La Tabla 3.1 muestra que el uso de las películas delgadas de ZnS/ZnO [6] integradas al laminado no reduce la transmitancia visible (86-87%) de manera notable, o modifican los parámetros de control solar en comparación con un vidrio laminado simple. Sin embargo, adicionando una película delgada de CuS de 100 o 150 nm de espesor, depositada directamente sobre un vidrio de 2 mm de espesor, Figura 3.1 (d), o una película delgada de ZnS de 60 nm depositada sobre vidrio claro y posteriormente una película de CuS de 100 o 150 nm de espesor, Figura 3.1 (e), modifican significativamente los parámetros de control solar.

La Figura 3.3 muestra que la transmitancia en la región del visible se reduce a valores del 20 al 40% y la transmitancia en el cercano infrarrojo se reduce casi hasta el 10%. La transmitancia óptica tiene su valor máximo cerca de los 565 nm, los cuales

corresponden a la máxima sensibilidad del ojo humano para la visión fotópica (luz de día) [9]. La forma tipo campana de la curva de transmitancia es a causa de la conductividad eléctrica,  $> 10^3 \Omega^{-1} \text{cm}^{-1}$ , de las películas delgadas de CuS utilizadas. Esta transformación del CuS a un semiconductor degenerado, conduce a una fuerte absorción óptica en la región del cercano infrarrojo debido a la absorción de la radiación por los portadores libres, como se observa en la Figura 2.21 del apartado 2.4. Esta característica también es común en las películas delgadas de  $\text{Cu}_{2-x}\text{Se}$  [10].

La alta conductividad eléctrica ( $> 2 \times 10^3 \Omega^{-1} \text{m}^{-1}$ ) también causa un aumento en la reflectancia en el cercano infrarrojo, comparado con un vidrio laminado sencillo (vidrio / PVB / vidrio) y un vidrio laminado que integra películas de ZnS/ZnO, como se muestra en las curvas de reflectancia R (%) de la Figura 3.3.



**Figura 3.3** Transmitancia óptica (T%), reflectancia óptica (R%) de *avilcrasol* sencillo y con películas delgadas de ZnS (60 nm espesor), CuS (100 y 150 nm), ZnS-CuS y (100 y 150 nm).

Además, la naturaleza semiconductor de las películas delgadas de CuS con brecha de energía de 1.5 a 2 eV sugiere que las transiciones ópticas a causa de la absorción de la brecha de energía deberían fijarse en longitudes de onda  $< 830 \text{ nm}$ . Hacia la región UV, el coeficiente de absorción óptica tiene valores  $> 10^5 \text{ cm}^{-1}$ , lo cual causa que la

transmitancia óptica disminuya más que un vidrio laminado sencillo, como se puede observar en la inserción de la Figura 3.3. En la Tabla 3.1 se observa que la  $T_{UV}$  cae hasta valores de 0.002% cuando está presente la película delgada de CuS. Los valores de transmitancia en la región del visible ( $T_{VIS}$ ) de 39% y 22% para los vidrios laminados que integran películas delgadas de CuS de 100 y 150 nm de espesor respectivamente, con o sin películas delgadas de ZnS como sustrato, están en el rango de valores de los envidriados para el control de la radiación solar disponibles en el mercado para su aplicación en climas cálidos.

La mayor ventaja de las películas delgadas de CuS es que la reflectancia en la región del visible ( $R_{VIS}$ ) es del 8 al 12%, lo cual elimina el deslumbramiento a edificaciones vecinas, tomando en cuenta que los vidrios controladores de la radiación solar comerciales tienen valores de  $R_{VIS} > 30\%$ . La alta absorción solar ( $A_{SOL}$ ) de los *avilcrasol* que integran películas delgadas de CuS, de 65 a 80%, causa el calentamiento de éstos (45-60°C) bajo condiciones de operación típicas a la luz del día, pero la energía térmica absorbida se disipa en su mayoría hacia el exterior cuando el coeficiente convectivo de transferencia de calor al exterior también aumenta.

Álvarez *et al.* [11] observaron que con un coeficiente convectivo de transferencia de calor ( $h_o$ ) de 20 W/m<sup>2</sup>K y una temperatura exterior de 15°C se obtiene un SHGC de 0.3 aproximadamente, y con el mismo  $h_o$  y una temperatura exterior de 32°C, el SHGC sube a 0.4 aproximadamente, es decir, hay mayor disipación de calor al exterior y por tanto se obtiene un ahorro de energía al reducirse el uso de los equipos de acondicionamiento del aire [12,13].

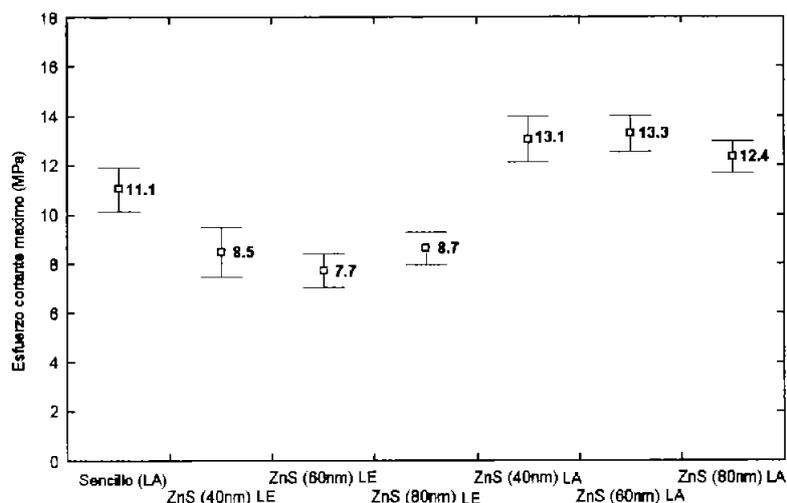
La Alerta Tecnológica Federal (FTA por sus siglas en inglés), del Departamento de Energía (DOE) de los Estados Unidos de Norteamérica, define a un envidriado espectralmente selectivo como aquel que bloquea grandemente o reduce la transmisión solar en el rango del visible, con una  $T_{VIS}$  no menor a 40% [14]. La Tabla 3.1 sugiere que las películas delgadas de CuS con espesores menores a 100 nm, depositadas con

tiempos menores a 4 h, pueden satisfacer los requerimientos de la FTA para su aplicación en envidriados arquitectónicos ubicados en climas cálidos.

La Figura 3.3 y la Tabla 3.1 muestran que las propiedades ópticas de las películas delgadas de CuS y ZnS-CuS, para un mismo espesor del CuS son casi las mismas. En caso de no tener mejoramiento en la resistencia adhesiva de los vidrios laminados, no se justifica el uso de las películas delgadas de ZnS. Se pretende establecer el beneficio de las películas delgadas de ZnS en los vidrios laminados, mediante la prueba de esfuerzos compresivos y cuantificar el mejoramiento de la adhesión.

### 3.4.2 Caracterización Mecánica

La caracterización mecánica de los *avilcrasol* se llevó a cabo utilizando sólo las seis probetas de la parte central de éstos, ilustrada en la Figura 2.20 del Capítulo 2. El promedio de la resistencia adhesiva de las seis probetas se utilizó para cuantificar la adhesión de un *avilcrasol* en particular. La razón por la cuál sólo se utilizaron las seis probetas de la parte central del *avilcrasol* se describe a detalle en el apartado 2.3.1 del Capítulo 2.

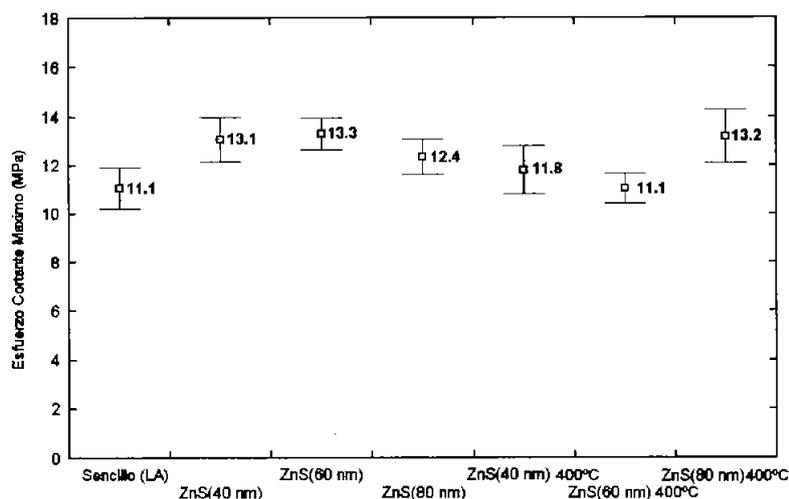


**Figura 3.4** Esfuerzos cortantes máximos soportados antes de la falla del vidrio laminado fabricado con el lado aire (LA) en contacto con el PVB como referencia, y con películas delgadas de ZnS con espesores de 40, 60 y 80 nm depositadas en el lado estaño (LE) y lado aire (LA) en contacto con el PVB.

Es un hecho aceptado que los vidrios laminados fabricados con el lado aire en contacto con la hoja de PVB tienen valores de adhesión mayores a los laminados con el lado estaño, a causa de una mayor micro-rugosidad [7]. En este Capítulo se compara la adhesión de un vidrio laminado fabricado con lado aire y lado estaño en contacto con el PVB. También se compara la adhesión de un vidrio laminado sencillo (vidrio / PVB / vidrio) con la adhesión de laminados que incorpora películas delgadas de ZnS de 40 a 80 nm de espesor, las cuales se depositaron sobre el lado aire y el lado estaño del vidrio.

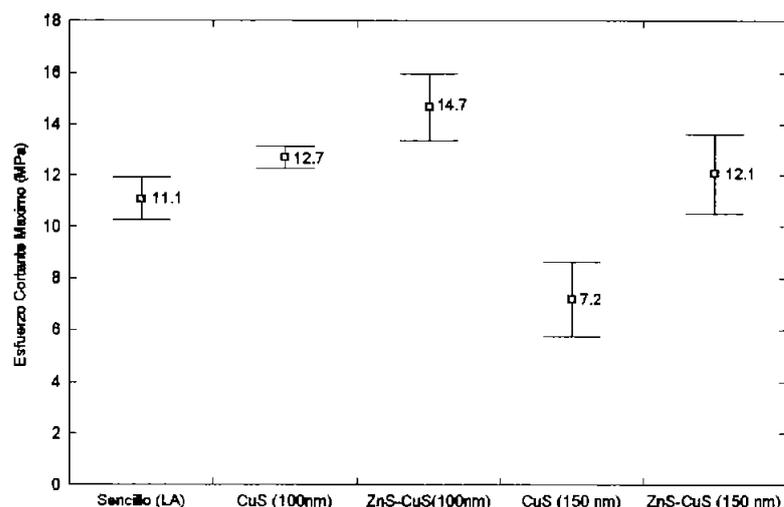
La Figura 3.4 muestra que, de hecho, los laminados con películas de ZnS depositadas sobre el lado estaño tienen valores de adhesión menores (7.8 – 8.7 MPa) a los laminados con la película de ZnS (11.1 MPa) depositada en el lado aire y en contacto con el PVB. La presencia de las películas de ZnS depositadas en el lado aire del vidrio que están en contacto con el PVB producen una adhesión mayor, con valores de esfuerzo cortante en los cuales ocurre la falla, de 12.4 a 13.3 MPa.

Se ha reportado en trabajos anteriores [6] que al hornear las películas delgadas de ZnS a temperaturas de 400 a 500°C en una atmósfera de aire, la capa superficial se convierte parcialmente en ZnO. La Figura 3.5 muestra que ésta modificación no trae consigo ningún mejoramiento de la adhesión en los laminados. La tendencia general es que la adhesión disminuye en comparación con los laminados que integran películas de ZnS sin hornear. Sin embargo, los valores del esfuerzo cortante se mantienen a la par que en un vidrio laminado sencillo, con el lado aire en contacto con el PVB.



**Figura 3.5** Esfuerzo cortante máximo soportado por vidrios laminados con películas delgadas de ZnS y ZnS/ZnO depositadas sobre el lado aire (LA) y en contacto con el PVB.

En 1989 Nair *et al.* [15] reportaron prospectos de películas para el control de la radiación solar depositadas químicamente y posteriormente reportaron las características casi ideales para el control de la radiación solar de películas delgadas de CuS depositadas químicamente [9]. El deterioro de estas películas en el ambiente condujo al desarrollo de vidrios laminados donde la película delgada de CuS se incorpora dentro del vidrio laminado [16]. El comportamiento térmico de éstos laminados fue posteriormente reportado por Álvarez *et al.* [13], pero hasta la fecha no se ha establecido si las propiedades mecánicas de tales laminados son comparables con los vidrios laminados sencillos (vidrio / PVB / vidrio). La Figura 3.6 muestra el esfuerzo cortante máximo soportado por los *avilcrasol* producidos con películas delgadas de CuS de 100 y 150 nm de espesor, depositadas sobre el lado estaño de un vidrio claro de 2 mm o sobre una película delgada de ZnS previamente depositada en el lado aire de un vidrio claro.



**Figura 3.6** Esfuerzo cortante máximo soportado por vidrios laminados con películas delgadas de CuS y ZnS-CuS depositadas en el lado aire de un vidrio claro de 2 mm de espesor en contacto con el PVB.

Se ha reportado anteriormente [4] el uso de las películas delgadas de ZnS para el mejoramiento de la adhesión de las películas de CuS a los sustratos de vidrios en tiempos de depósito prolongados, pero no se había cuantificado este mejoramiento de la adhesión. Se observa de la Figura 3.6, que los vidrios laminados que incorporan películas delgadas de CuS con espesores de 100 nm soportan un esfuerzo cortante máximo de 12.7 MPa, pero éste se ve mejorado notablemente al depositar la película de CuS sobre una de ZnS previamente depositada sobre vidrio, ya que se alcanza un valor de esfuerzo de 14.7 MPa. En ambos casos los valores del esfuerzo máximo son mayores al presentado por un vidrio laminado sencillo, 11.1 MPa. Este aumento de adhesión obedece a que las películas de ZnS tienen una rugosidad mayor que la superficie del vidrio, como se observó en el apartado 2.1.4, lo cual explica el aumento en la resistencia adhesiva.

La transmitancia óptica disminuye al aumentar el espesor de la película delgada de CuS, por tanto para la aplicación de éste tipo de vidrios en climas cálidos se requiere de películas de CuS de mayor espesor. Se observa en la Tabla 3.1 que las películas de CuS con espesores de 150 nm depositadas en la parte interna de ambos vidrios que componen el vidrio laminado (Figura 3.1 (d) y (e)), presentan una transmitancia en el visible de 22%, satisfactoria para climas cálidos. La absorción solar > 75% ayuda a

mejorar la disipación al exterior de la energía solar absorbida. La Figura 3.6 muestra que los *avilcrasol* con películas delgadas de CuS presentan una resistencia adhesiva de 7.2 MPa, menor que la de un vidrio laminado sencillo. El uso de películas delgadas de ZnS mejora ésta situación, alcanzándose valores de resistencia adhesiva de 12.1 MPa, siendo mayor éste al de un vidrio laminado sencillo (11.1 MPa).

De los resultados anteriores, se tiene una clara evidencia del mejoramiento de la adhesión o resistencia adhesiva de los vidrios laminados al incorporar películas delgadas de ZnS como promotoras de adhesión. La resistencia adhesiva se incrementó aproximadamente un 15% en el caso de las películas delgadas de CuS de 100 nm de espesor depositadas sobre ZnS y más del 60% para el caso de películas delgadas de CuS con 150 nm de espesor. La presencia de las películas delgadas de CuS asegura que la resistencia adhesiva soportada por el laminado sea superior a la de un vidrio laminado sencillo.

El estándar de resistencia adhesiva que tienen las empresas fabricantes de vidrios laminados automotrices es de  $10 \pm 1$  MPa [17]. De los resultados anteriores se observa que la mayoría de los laminados están por arriba de este estándar, pero esto no es un problema, ya que modificando el proceso de laminación de los vidrios, se puede reducir esta adhesión a los valores permisibles para la industria automotriz. A menor tiempo, presión y temperatura en el proceso de laminado, la adhesión será inferior. En los envidriados para la industria arquitectónica se deben definir los valores de adhesión (normados) dependiendo la ubicación geográfica de aplicación de los mismos y a los fenómenos meteorológicos a que se someten éstos.

### **3.4.3 Modificación de las Propiedades Ópticas y Mecánicas con la Adición de una Película Delgada de $\text{Cu}_{2-x}\text{Se}$ .**

Se mencionó en el apartado 2.1.5 que el propósito de usar películas delgadas de  $\text{Cu}_{2-x}\text{Se}$  depositadas químicamente como recubrimiento para el control de la radiación solar es su buena estabilidad química y térmica [10] al medio ambiente, comparadas con las películas delgadas de CuS. Al depositar una película delgada de  $\text{Cu}_{2-x}\text{Se}$  sobre

una de CuS y laminarlas en autoclave a 130°C durante 30 minutos, se obtiene una tonalidad diferente (dorada) a la de una película delgada de CuS (verde olivo). Se ha trabajado con dos baños químicos diferentes de  $\text{Cu}_{2-x}\text{Se}$ , una para el crecimiento de películas delgadas y la otra sólo como protección de las películas delgadas de CuS, como se muestra en la Tabla 2.4 del Capítulo 2. En éste caso, se utilizó el baño químico para protección del CuS, que es relativamente más diluido. La duración del depósito fue de 5 minutos a temperatura ambiente, tiempo en el cual se considera que el crecimiento de la película alcanza espesores de 10 a 20 nm y sirve como capa protectora del CuS. Las características ópticas de este tipo de *avilcrasol* fueron reportadas en [18,19], ver apartado 2.1.6, Figura 2.7.

Para determinar la influencia que tiene la película de  $\text{Cu}_{2-x}\text{Se}$  en las propiedades ópticas y mecánicas de los *avilcrasol*, de las películas de CuS y ZnS-CuS descritas en el apartado 3.2.2 de éste Capítulo, se les depósito una película de  $\text{Cu}_{2-x}\text{Se}$  durante 5 min y posteriormente se laminaron con las condiciones descritas en éste Capítulo. La Figura 3.7 muestra los espectros de transmitancia óptica y reflectancia especular de los *avilcrasol* que integran películas de  $\text{Cu}_{2-x}\text{Se}$  sobre CuS con 100 nm y 150 nm de espesor. Las películas delgadas semiconductoras (PDS) se colocaron en la parte interior del *avilcrasol*, siguiendo las configuraciones mostradas en las Figuras 3.1 (d) y (e). Se observa un ligero desplazamiento del pico máximo en la curva de transmitancia de los *avilcrasol* que integran  $\text{Cu}_{2-x}\text{Se}$ .

Esta característica típica de las películas de  $\text{Cu}_{2-x}\text{Se}$  se explica en el apartado 2.1.5 del Capítulo 2. A causa del desplazamiento de la curva de transmitancia, la tonalidad del *avilcrasol* cambia de un verde olivo para el CuS (100 nm espesor) a un dorado cuando se añade la película delgada de  $\text{Cu}_{2-x}\text{Se}$  a la de CuS. Esta característica se reduce al aumentar el espesor de la película de CuS, como se puede observar en los patrones de transmitancia (2), (3) y (5) de la Figura 3.7.

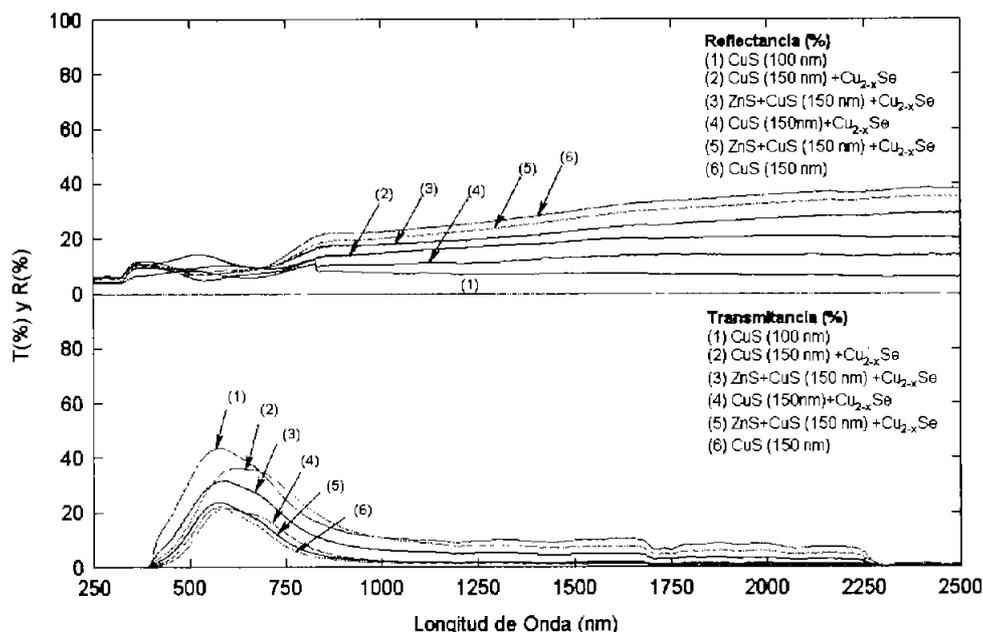
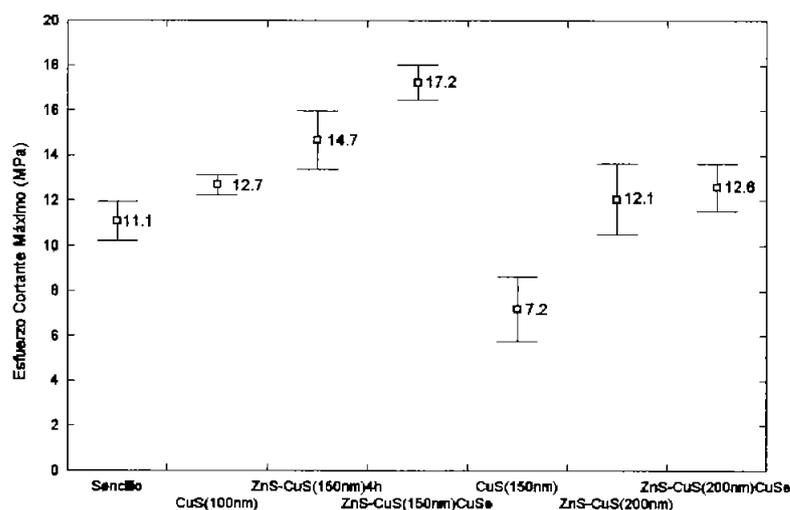


Figura 3.7 Modificación óptica de los *avilcrasol* al depositar una película de  $\text{Cu}_{2-x}\text{Se}$  sobre una película de CuS con espesores de 100 nm y 150 nm.

En la Tabla 3.2 se presentan los parámetros ópticos de los *avilcrasol* mostrados en la Figura 3.7. Además de conocer los cambios en las propiedades ópticas de los *avilcrasol* que integran películas de  $\text{Cu}_{2-x}\text{Se}$ , es necesario determinar la influencia que éstas tienen en la resistencia adhesiva de los mismos. Se utilizó el mismo método de prueba descrito en el apartado 3.3.2 así como las mismas condiciones experimentales.

Tabla 3.2 Parámetros ópticos de los *avilcrasol* mostrados en la Figura 3.7

Tipo de <i>avilcrasol</i>	$T_{UV}$	$R_{UV}$	$T_{VIS}$	$R_{VIS}$	$T_{SOL}$	$R_{SOL}$	$A_{SOL}$	$T_{NIR}$	$R_{NIR}$
(1)	0.00	5.8	39.8	7.4	<b>21.8</b>	<b>7.3</b>	<b>70.9</b>	11.6	7.6
(2)	0.00	9.4	28.4	9.8	<b>18.0</b>	<b>12.3</b>	<b>69.7</b>	11.5	15.7
(3)	0.00	9.2	28.0	13.1	<b>14.7</b>	<b>15.0</b>	<b>70.3</b>	6.9	19.4
(4)	0.00	8.1	17.2	5.5	<b>8.4</b>	<b>9.0</b>	<b>82.6</b>	3.0	11.5
(5)	0.00	9.8	20.5	7.9	<b>8.9</b>	<b>14.7</b>	<b>76.4</b>	2.7	22.3
(6)	0.00	10.3	18.5	7.3	<b>7.7</b>	<b>16.0</b>	<b>76.3</b>	2.1	25.0



**Figura 3.8** Esfuerzo cortante máximo soportado por los *avilcrasol* que integran películas delgadas de CuS, CuS-Cu<sub>2-x</sub>Se, ZnS-CuS y ZnS-CuS-Cu<sub>2-x</sub>Se, depositadas sobre el lado aire de ambos vidrios que lo forman.

La Figura 3.8 presenta los valores de resistencia adhesiva máxima para los *avilcrasol* descritos en este apartado. Se observa que el *avilcrasol* ZnS-CuS(150 nm)-Cu<sub>2-x</sub>Se presenta un mejoramiento de adhesión de aproximadamente 17%, y en el *avilcrasol* ZnS-CuS(200 nm)-Cu<sub>2-x</sub>Se el cambio no es significativo. Estadísticamente se puede inferir que los *avilcrasol* ZnS-CuS(200nm) y ZnS-CuS(200 nm)-Cu<sub>2-x</sub>Se son iguales, dado que los valores de su respectiva desviación estándar se traslapan.

Una característica muy importante de los *avilcrasol* que integran películas delgadas de Cu<sub>2-x</sub>Se, es que durante la prueba de adhesión se separaban completamente. Esto se debe a que al tener una resistencia adhesiva mayor, el PVB está muy restringido de movimiento, es decir, no se puede deformar con facilidad para cumplir su función de absorber energía, ya sea de impacto o de deslizamiento relativo de las superficies de vidrio, durante la prueba de resistencia adhesiva por corte compresivo. Es necesario estudiar con más detalle este tipo de comportamiento, para determinar si es factible su aplicación en envidriados espectralmente selectivos y de seguridad en regiones geográficas con clima cálido.

### 3.5 Conclusiones

En éste capítulo se reportaron las características ópticas y mecánicas de *avilcrasol* con PDS de ZnS, CuS, ZnS-CuS, CuS- Cu<sub>2-x</sub>Se y ZnS-CuS- Cu<sub>2-x</sub>Se. También se reporta el mejoramiento de la adhesión en vidrios laminados mediante el uso de películas delgadas de ZnS depositadas sobre vidrio claro de 2 mm de espesor. Los laminados producidos con películas de ZnS depositadas en el lado aire de un vidrio claro, mostraron un mejoramiento de adhesión del 15 al 20%, comparado con un vidrio laminado sencillo bajo las mismas condiciones de fabricación y ensayo. El horneado de las películas delgadas de ZnS a 400°C produce una capa superficial de ZnO, que no mejora la adhesión de los vidrios laminados.

Se ha mostrado también que las propiedades ópticas y el desempeño térmico de los *avilcrasol* esta en función del espesor y la conductividad eléctricas de las películas delgadas de CuS, sin que las películas delgadas de ZnS tengan un papel importante en éste aspecto. Sin embargo, la presencia de ZnS, conduce a un considerable aumento en la resistencia adhesiva de los laminados. La resistencia adhesiva máxima soportada por los vidrios laminados con películas delgadas de ZnS-CuS fue mayor a los 10 MPa que marca el estándar. Estos resultados son muy importantes para la aplicación de vidrios laminados controladores de la radiación solar en edificaciones ubicadas en regiones cálidas que estén expuestas a fenómenos climatológicos tales como huracanes o tormentas tropicales.

Finalmente, se concluye que los *avilcrasol* presentados en éste Capítulo son recomendables para su producción en áreas pequeñas de hasta 0.25 m<sup>2</sup>, ya que el riesgo de rompimiento de los vidrios durante el proceso de limpieza es muy grande. En el Capítulo 4 se plantea el depósito de las PDS sobre hojas de PET, con lo cual se reduce considerablemente el riesgo de manejar vidrios de grandes dimensiones en el proceso de limpieza.

**Bibliografía**

1. Muralidhar S, Jagota A, Bennison S J and Saigal S, **Mechanical behaviour in tension of cracked glass bridged by an elastomeric ligament**, *Acta Materialia*, **48**(2000)4577.
2. Huntsberger J R, **Adhesion of plasticized poly(vinyl butyral) to glass**, *J Adhesion*, **13**(1981)107.
3. Gorokhovskiy A, Matzov K and Escalant-Garcia J I, **Modification of the float-glass surface by treatment with urea aqueous solution**, *J Non Cryst Solids*, **291**(2001)43.
4. Nair P K and Nair M T S, **Chemically deposited ZnS thin films: application as substrate for chemically deposited Bi<sub>2</sub>S<sub>3</sub>, Cu<sub>x</sub>S and PbS thin films**, *Semicond Sci Technol* **7** (1992) 239.
5. Huang L, Nair P K, Nair M T S, Zingaro R A and Meyers E, **Interfacial diffusion of metal atoms during air annealing of chemically deposited ZnS-CuS and PbS-CuS thin films**, *J. Electrochem. Soc.* **141**(1994)2536.
6. Arenas O L, Nair M T S and Nair P K, **Chemical bath deposition of ZnS thin films and modifications by air annealing**, *Semicond. Sci. Technol.* **12** (1997)1323.
7. [www.trosifol.co./index1024.html](http://www.trosifol.co./index1024.html).
8. Sekisui S-Lec de México, CIVAC Morelos (México), fabricante de PVB.
9. Nair M T S and Nair P K, **Near-ideal solar control characteristics of Cu<sub>x</sub>S thin films**, *Semicond. Sci. Technol.* **4** (1989) 599.
10. Garcia V M, Nair P K and Nair M T S, **Copper selenide thin films by chemical bath deposition**, *J Cryst. Growth* **203** (1999)113.
11. Alvarez Garcia G, Flores J J, Aguilar J O, Gómez-Daza O, Nair, M T S and Nair, P K, **Spectrally selective laminated glazings consisting of solar control and heat mirror coated glass: preparation, characterization and modelling of heat transfer**, *Solar Energy* **78** (2005) 113.
12. Estrada G C A, Alvarez-Garcia G and Nair P K, **Theoretical analysis of the thermal performance of chemically deposited solar control coatings**, *J Phys. D: Appl. Phys.* **26** (1993)1304.

13. Alvarez-Garcia G, Flores JJ and Nair P K, **Influence of thermal emittance on the performance of laminated solar control glazing** *Appl. Thermal Engineering*, **21** (2001)1813.
14. U.S Department of Energy report DOE/EE-0173 (August 1998): *Spectrally glazings*, contacts: <http://www.eren.doe.gov/femp> and [theodor.collins@hq.doe.gov](mailto:theodor.collins@hq.doe.gov) or [eslee@lbl.gov](mailto:eslee@lbl.gov).
15. Nair P K, Nair M T S, Fernandez A and Ocampo M, **Prospects of chemically deposited metal chalcogenide thin films for solar control applications**, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **22** (1989) 829.
16. Nair P K, Nair M T S, Gomez-Daza O, Garcia V M, Castillo A, Arenas O L, Peña Y and Guerrero L, **Laminated solar control safety glass incorporating chemically deposited metal chalcogenide thin films**, *The international Society for optical Engineering, Bellingham, Proc. SPIE 3138* (1997)186.
17. Sekurit Saint Gobain Glass, **SSGG**, México, Departamento de aseguramiento de Calidad, Cuautla Morelos, México. Empresa fabricante de vidrios laminados automotrices.
18. Aguilar J O, Gomez-Daza O, Pliego O E, Garcia U D, Nair P K and Nair M T S, **Películas delgadas de CuS y CuS-Cu<sub>2-x</sub>Se para fabricación de vidrios laminados controladores de la radiación solar**, *Memorias XXV Semana Nacional de Energía Solar*, ANES, 1-5 oct. 2001.
19. Nair P K, Aguilar J O, Gomez-Daza O and Nair M T S, **Chemically deposited CuS and Cu<sub>2-x</sub>Se coatings in the production of spectrally selective laminated solar control coatings**, *Meeting of the Electrochemical Society*, Paris France, ISSN 1091-8213, ISBN1-56677-382-2, vol. **2003-01**, p 564.

## **CAPÍTULO 4**

### **AVILCRASOL CON PELÍCULAS DELGADAS SEMICONDUCTORAS DE CuS Y CuS-Cu<sub>2-x</sub>Se SOBRE PET**

En el Capítulo 3 se presentó el desarrollo de *avilcrasol* que integran películas delgadas de ZnS, CuS y una combinación de éstas con Cu<sub>2-x</sub>Se, las cuales se depositaban directamente sobre vidrio claro de 2 mm de espesor. Los inconvenientes que presentan este tipo de *avilcrasol* son el riguroso proceso de limpieza que requieren las hojas de vidrio previo al depósito de las películas delgadas semiconductoras, aún con las películas de ZnS como sustrato. En el manejo del vidrio durante el proceso de limpieza antes y después del depósito químico, se corre el riesgo de rompimiento de éste. Para evitar o reducir éstos inconvenientes se desarrolló una nueva configuración de *avilcrasol*, la cual consiste en depositar las películas delgadas de CuS y Cu<sub>2-x</sub>Se sobre hojas de tereftalato de polietileno (PET). En un reporte preliminar desarrollado como parte de éste trabajo de investigación, se muestran las características ópticas de éste tipo de *avilcrasol* [1]. En éste Capítulo se presentan las características ópticas y de resistencia adhesiva de los *avilcrasol* mencionados anteriormente, para determinar si se pueden utilizar como vidrios laminados de control solar y de seguridad en regiones

geográficas de clima cálido y propensas a fenómenos climatológicos como huracanes y tormentas tropicales.

#### **4.1 Generalidades**

Pantelides *et al.* [2] presentaron los resultados experimentales del comportamiento de vidrios laminados del tipo, (i) vidrio / PVB / vidrio y (ii) vidrio / PVB / PET / PVB / Vidrio, sujetos a cargas cíclicas de viento y a impactos de proyectiles arrastrados por el viento. Utilizaron tres tipos de vidrio claro: recocido, semi templado y templado, para la fabricación de vidrios laminados. Un resultado importante que se reporta es que los vidrios laminados con vidrio semi-templado en la configuración (ii) poseen un comportamiento mecánico significativamente mejor que los laminados con el mismo tipo de vidrio pero utilizando la configuración (i).

Se considera que la doble hoja de PVB, además de la hoja de PET, contribuyen al mejor comportamiento mecánico de éste tipo de laminado. Hasta el momento no se han reportado investigaciones referentes a la resistencia adhesiva de vidrios laminados que integran PET. En éste trabajo se cuantificará la resistencia adhesiva de vidrios laminados con películas delgadas de CuS y  $\text{Cu}_{2-x}\text{Se}$  depositadas sobre PET y se determinará la influencia que tienen las películas delgadas en la resistencia adhesiva de los mismos.

La aplicación con mayor perspectiva de los *avilcrasol* con PET está en la industria arquitectónica, ya que en la automotriz el proceso de laminación de vidrios tiene una eficiencia muy baja. Esto es porque, en la actualidad la mayoría de los parabrisas tienen curvaturas muy pronunciadas, y al colocar el PET dentro del laminado, éste sufre deformaciones o pliegues originados por la curvatura misma. Sin embargo, no se descarta su aplicación para los vidrios laterales de los vehículos, como vidrio laminado de seguridad o incluso blindado, incorporando además películas de control solar.

## 4.2 Depósito Químico de Películas Delgadas de CuS y Cu<sub>2-x</sub>Se

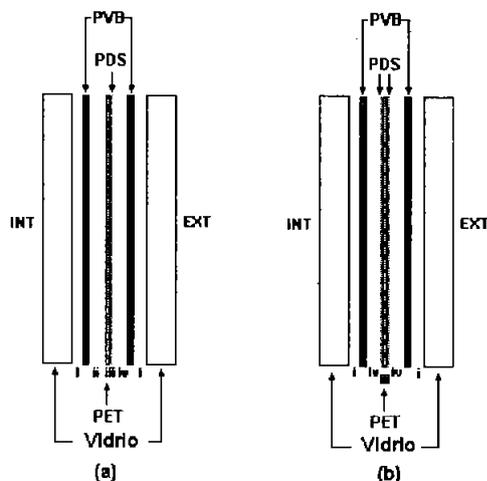
La técnica de depósito por baño químico (CBD) y las formulaciones para obtener las películas delgadas semiconductoras de CuS y Cu<sub>2-x</sub>Se se describieron en los apartados 2.1.5 y 2.1.6 del Capítulo 2 respectivamente. Se utilizaron hojas de PET como sustrato para el depósito químico de las películas delgadas, con dimensiones de 10 cm x 12.5 cm. El depósito se llevó a cabo por "flotación", colocando las hojas de PET flotando sobre la solución que compone el baño químico. En algunos casos, se depositaron películas en ambos lados de la hoja de PET, con el propósito de tener mejores características ópticas y térmicas. La duración del depósito para las películas de CuS estuvo en el intervalo de 2 a 6 h y para las películas de Cu<sub>2-x</sub>Se depositadas sobre CuS, fue de 5 a 10 min. Después de depositar las películas delgadas, las hojas de PET se enjuagaron con agua destilada y se secaron con aire frío. Si se utiliza aire caliente para el secado de éstas, se deformarán permanentemente y se descarta su uso para el desarrollo de los *avilcrasol*.

Se mencionó en el apartado 2.1.6 del Capítulo 2, que las películas de Cu<sub>2-x</sub>Se tienen la finalidad de proporcionar estabilidad al medio ambiente a las películas de CuS, además de que durante el proceso de laminación se obtienen tonalidades diferentes, de un verde olivo para las películas de CuS, a un dorado cuando se deposita la película de Cu<sub>2-x</sub>Se sobre la de CuS.

## 4.3 Configuración de los *Avilcrasol* y Proceso de Laminación

Las configuraciones utilizadas para la obtención de los *avilcrasol* se muestran en la Figura 4.1, donde se puede apreciar que hay una película delgada semiconductoras (PDS) en uno o ambos del PET. Los espesores de los materiales que componen el *avilcrasol* fueron de 2 mm, 0.76 mm y 0.1 mm para el vidrio, PVB y PET respectivamente. La Figura 4.1 muestra las interfases del *avilcrasol*, la interfase (i) representa la unión vidrio / PVB, (ii) la unión PVB / PET, (iii) la unión PET / PDS y (iv) la unión PVB / PDS. La identificación de las interfases es de gran ayuda para determinar

en donde ocurre la falla o delaminación del *avilcrasol* durante la prueba de resistencia adhesiva y con ello proponer criterios para el mejoramiento de la adhesión. Los procesos de preparación, pre-laminación, laminación y obtención de las probetas de los *avilcrasol* fueron los mismos que se reportaron en los Capítulos 2 y 3. Si la temperatura del proceso de laminación excede los 140° C, el PET sufrirá deformaciones y aunque el vidrio laminado sea plano, se formarán pliegues en los extremos y/o esquinas del mismo.



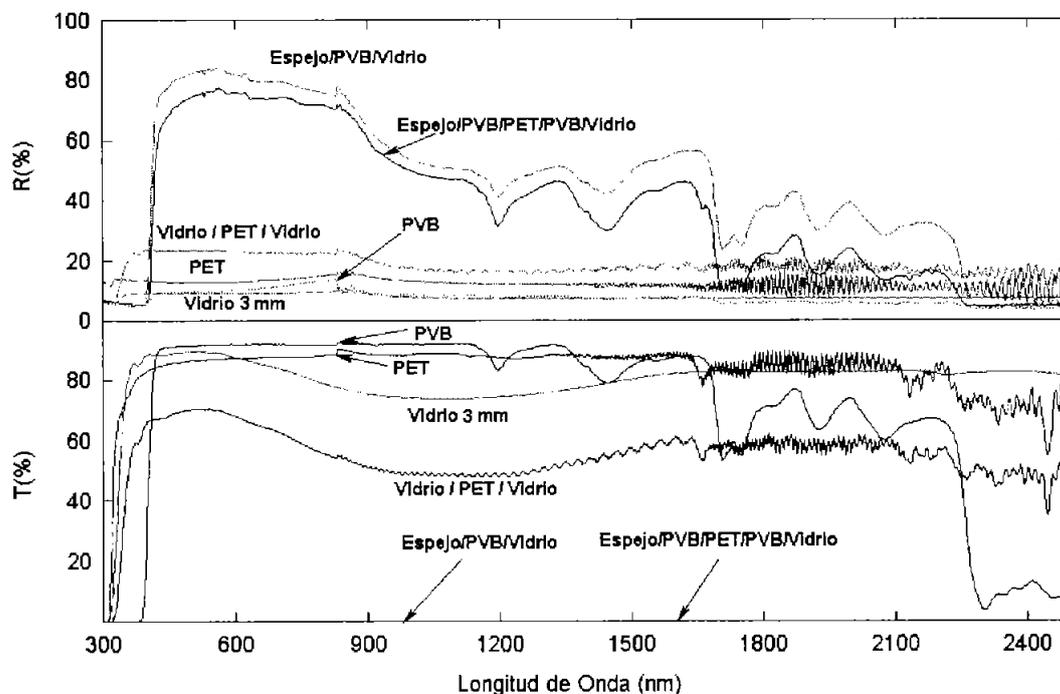
**Figura 4.1** Configuración de los *avilcrasol* que integran PET como sustrato para las películas delgadas de CuS y CuS-Cu<sub>2-x</sub>Se.

## 4.4 Caracterización

### 4.4.1 Caracterización Óptica

Utilizando el mismo procedimiento y el equipo reportados en el Capítulo 3, se obtuvieron los espectros de transmitancia óptica (T%), reflectancia especular (R%) y absorbancia (A%) de los *avilcrasol*. Los parámetros ópticos de control solar fueron evaluados de acuerdo a la norma ISO 9050:2003 para las regiones ultravioleta (UV, 300-380 nm), visible (VIS, 380-780 nm), cercano infrarrojo (NIR, 780-2500 nm) y el rango espectral total (300-2500 nm), los cuales se describen a detalle en el apartado 1.3.6 del Capítulo 1. La Figura 4.2 muestra los espectros T% y R% de los elementos que componen el vidrio laminado.

Para conocer la modificación de las propiedades ópticas de los *avilcrasol* al colocar una segunda hoja de PVB y la hoja de PET, se realizó un experimento que consistió en laminar dos espejos de segunda superficie con las configuraciones siguientes: espejo aluminio 2 mm / PVB / vidrio 3 mm y espejo aluminio 2 mm / PVB / PET / PVB / vidrio 3 mm de espesor. Además, se obtuvieron los parámetros ópticos del PVB, PET y vidrio de 3 mm de espesor. Se observa que el PVB presenta picos de absorción en la región del cercano infrarrojo, además de tener la cualidad de filtrar casi la totalidad de la radiación ultravioleta. Por su parte el PET presenta espectros de T% y R% con interferencia óptica en la región del cercano infrarrojo, de los 1650 nm a los 2150 nm aproximadamente. También se observa que los espejos laminados con PVB y PET tienen una T% cercana a cero, y la R% alcanza valores de hasta 80% en la región del visible y de un 48 – 54% en la región del cercano infrarrojo. La Tabla 4.1 muestra los parámetros ópticos de T% y R% en las tres regiones de interés (UV, VIS y CIR) de los elementos mostrados en la Figura 4.2.



**Figura 4.2** Espectros de transmitancia óptica (T%) y reflectancia óptica (R%) de los elementos componentes de un *avilcrasol*)

**Tabla 4.1** Parámetros ópticos en % de los elementos componentes de un *avilcrasol*.

Tipo de elemento	T <sub>UV</sub>	R <sub>UV</sub>	T <sub>VIS</sub>	R <sub>VIS</sub>	T <sub>CIR</sub>	R <sub>CIR</sub>	T <sub>SOL</sub>	R <sub>SOL</sub>	A <sub>SOL</sub>
PET	69.8	13.6	86.9	12.8	87.4	13.1	86.5	13.1	0.4
PVB	0.01	5.3	91.7	9.9	85.8	8.8	84.5	9.4	6.2
Vidrio 3 mm espesor	66.3	8.2	88.7	8.9	77.1	8.0	82.0	8.5	9.4
Vidrio / PET / vidrio	38.8	17.1	69.3	23.2	52.3	18.5	59.5	20.9	19.6
Vidrio/PVB/PET/PVB/vidrio	0.00	7.4	85.9	13.8	65.4	10.1	71.3	12.1	16.7
Espejo / PVB / vidrio	0.00	5.2	0.0	82.5	0.0	54.6	0.0	64.8	35.2
Espejo /PVB/PET/PVB/vidrio	0.00	5.7	0.0	75.4	0.0	48.4	0.0	58.3	41.7

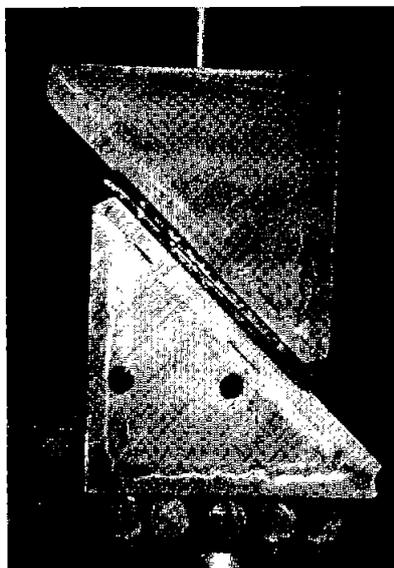
#### 4.4.2 Pruebas de Adhesión

Se utilizó el método de prueba de resistencia adhesiva por corte-compresivo descrito en el apéndice A. La Figura 4.1 muestra las interfases de los *avilcrasol* y el objetivo es determinar cual de éstas falla y además cuantificar la resistencia adhesiva de los *avilcrasol*. Las condiciones de las pruebas de resistencia adhesiva fueron las mismas que se utilizaron en el apartado 3.3.2 del Capítulo 3. Se utilizaron 6 probetas de 25 mm x 25 mm de área en cada caso, cortadas con una rueda de diamante de la parte central de los *avilcrasol*, con el propósito de tener valores de adhesión uniformes.

#### 4.5 Pruebas Preliminares de Adhesión a los *Avilcrasol* con PET

En el Capítulo 2 se hizo referencia a los tratamientos superficiales para el mejoramiento de la adhesión de las películas delgadas semiconductoras depositadas sobre vidrio y PET, que fueron reportados por López-Mata [3]. Aquí se describen los resultados preliminares de adhesión que dieron la pauta para el desarrollo de las pruebas de resistencia adhesiva por corte-compresivo. La prueba consistió en depositar películas delgadas de CuS y CuS-Cu<sub>2-x</sub>Se sobre PET con y sin tratamiento superficial con organosilanos. Las películas delgadas antes obtenidas se integraron a un *avilcrasol* y se laminaron. La dimensión de éstos fue de 10 cm x 10 cm. Los *avilcrasol* se colocaron en un *Disprad* con las mismas dimensiones que éstos, el cual se muestra en la Figura 4.3. La carga a la que fueron sujetos los *avilcrasol* se aplicó mediante un sistema hidráulico marca Erko (ubicado en el taller mecánico del CIE-UNAM) de forma manual por medio

de una palanca. La carga aplicada al *avilcrasol* se midió con un manómetro instalado en el sistema hidráulico, y las unidades fueron  $\text{kg}/\text{cm}^2$ .



**Figura 4.3** Primer dispositivo para pruebas de adhesión (*Disprad*), para realizar ensayos a los *avilcrasol* con dimensiones de 10 cm x 10 cm.

Ya que no había forma de controlar la carga aplicada al *avilcrasol*, los resultados de ésta experimentación se consideran cualitativos, sin embargo la Tabla 4.2 muestra los valores de resistencia adhesiva máximos observados, los cuales se toman como referencia para caracterizar la adhesión de los laminados.

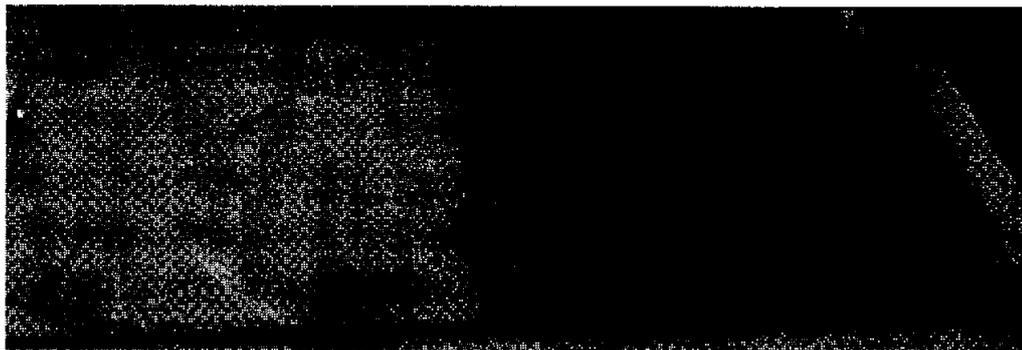
**Tabla 4.2** Esfuerzos cortantes máximos aplicados a los *avilcrasol*.

Tipo de <i>avilcrasol</i>	$\tau_{max}$ ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )	$\tau_{max}$ (MPa)	Interfase donde se presenta la falla (*)
V / PVB / PETct / CuS / PVB / V	100	9.81	V / PVB / PETct / CuS * PVB / V
V / PVB / PETct / CuS-Cu <sub>2-x</sub> Se / PVB / V	100	9.81	V / PVB / PETct / CuS-Cu <sub>2-x</sub> Se * PVB / V
V / PVB / PETst / CuS / PVB / V	90	8.83	V / PVB / PETst * CuS / PVB / V

$\tau_{max}$  es el esfuerzo cortante máximo aplicado a los *avilcrasol*.

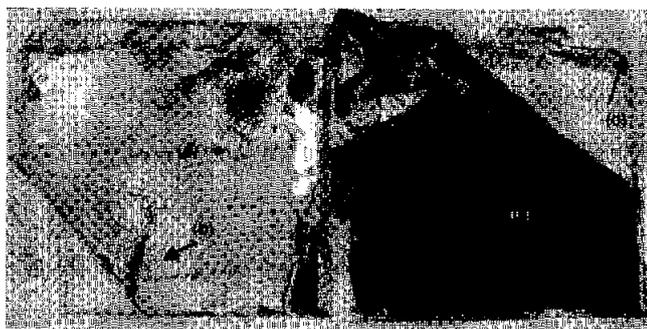
Se observa en la Tabla 4.2 que las interfases donde ocurre la falla en el laminado es donde se encuentra la película semiconductor, es decir, en la interfase CuS \* PVB, CuS-Cu<sub>2-x</sub>Se \* PVB o PETst \* CuS. Esto indica que las películas delgadas de CuS y

$\text{Cu}_{2-x}\text{Se}$  influyen de alguna manera en la resistencia adhesiva de los *avilcrasol*. La Figura 4.4 muestra que los *avilcrasol* que integran PET sin tratamiento superficial de organosilanos (OS) tienen una baja adhesión y esto se observa porque la película delgada de CuS depositada sobre la hoja de PET se desprende casi totalmente de ésta y queda adherida a la hoja de PVB. La interfase de falla en el *avilcrasol* mostrado en la Figura 4.4 es entre el PETst y la película delgada de CuS.



**Figura 4.4** *Avilcrasol* con PET sin tratamiento superficial después de la prueba de resistencia adhesiva por corte-compresivo.

Por su parte en el *avilcrasol* que integra hojas de PET tratadas superficialmente con OS y una película delgada de  $\text{CuS-Cu}_{2-x}\text{Se}$ , ésta permanece adherida en gran parte al PET, como se muestra en la Figura 4.5. La interfase de falla ahora es entre la película de  $\text{CuS-Cu}_{2-x}\text{Se}$  y la hoja de PVB.



**Figura 4.5** *Avilcrasol* con PET tratado superficialmente con OS después de la prueba de resistencia adhesiva por corte-compresivo.

Se observa que de la Figura 4.5 que (a) muestra a la hoja de PVB con sólo una pequeña parte de la película de  $\text{CuS-Cu}_{2-x}\text{Se}$  adherida, (b) y (d) muestra un doblez de la hoja de PVB y (c) muestra la hoja de PET con la película de  $\text{CuS-Cu}_{2-x}\text{Se}$  fuertemente

adherida a ésta. Esto demuestra que los tratamientos superficiales al PET con OS mejoran de manera considerable la adhesión de las películas de CuS y CuS-Cu<sub>2-x</sub>Se al PET, tal y como lo reporta López-Mata [3] en su trabajo y sólo queda cuantificar dicho mejoramiento en la adhesión.

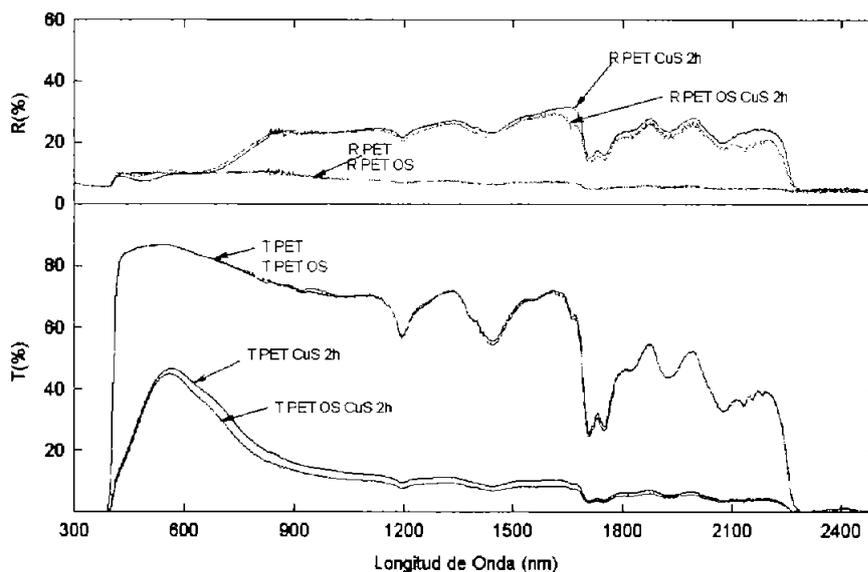
La caracterización mecánica para cuantificar el mejoramiento de la adhesión se describe en el apéndice A y en el apartado 3.3.2 del Capítulo 3 respectivamente. Los resultados reportados en éste apartado dieron la pauta para el desarrollo de las pruebas experimentales de resistencia adhesiva o adhesión con las que se pudo cuantificar la adhesión de los *avilcrasol*, y cuyos resultados se presentan en los apartados 3.4.2 y 4.6.2 de los Capítulos 3 y 4 respectivamente.

## 4.6 Resultados y Discusión

Se desarrollaron diferentes tipos de *avilcrasol*, utilizando películas delgadas de CuS y CuS-Cu<sub>2-x</sub>Se depositadas sobre hojas de PET con y sin tratamiento superficial con OS. De todos éstos, se eligieron los más representativos para evaluar las características ópticas y mecánicas. Se utilizaron películas delgadas de CuS con una duración del depósito de 2 y 4 h y películas delgadas de Cu<sub>2-x</sub>Se con una duración del depósito de 5 min.

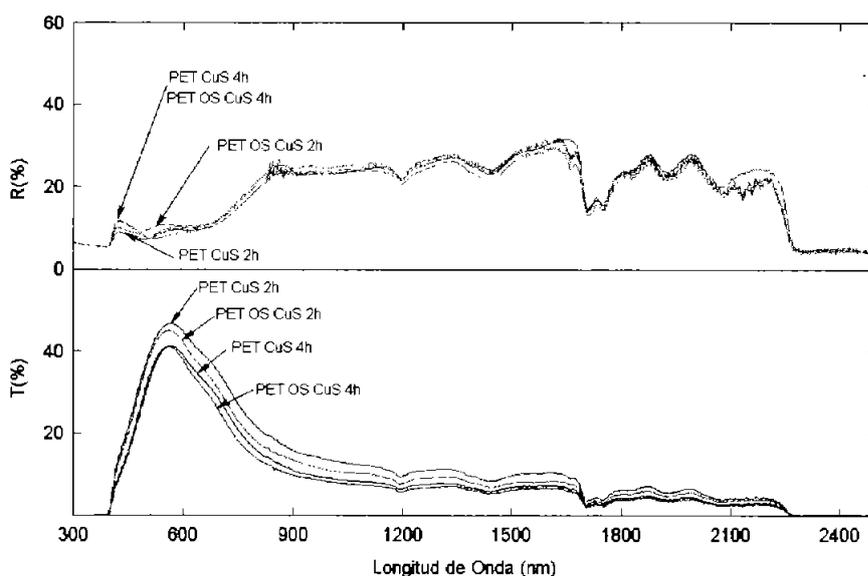
### 4.6.1 Caracterización Óptica

La Figura 4.6 muestra los espectros de T (%) y R (%) de las películas delgadas de CuS depositadas sobre hojas de PET con y sin tratamiento superficial con OS. Se observa que no existen diferencias significativas entre los espectros de T y R entre la hoja de PET con y sin tratamiento superficial, por esto se concluye que los organosilanos no afectan notablemente las propiedades ópticas de los *avilcrasol*. Entre tanto, cuando se deposita la película de CuS sobre la hoja de PET tratada superficialmente, tiene un crecimiento ligeramente mayor, esto se puede apreciar en la curva de transmitancia que es ligeramente menor en las regiones visible y del cercano infrarrojo. Se observa también una ligera diferencia en los espectros de reflectancia.



**Figura 4.6** Espectros de Transmitancia (T%) y Reflectancia (R%) de películas delgadas de CuS depositadas sobre hojas de PET con y sin tratamiento superficial con organosilanos.

La Figura 4.7 muestra los espectros de T(%) y R(%) de los *avilcrasol* con películas delgadas de CuS con una duración del depósito de 2 y 4 h sobre PET sin tratamiento superficial con OS. Los dos tipos de *avilcrasol* tienen el mismo comportamiento en cuanto a crecimiento de las películas de CuS. Éstas crecen ligeramente más sobre PET tratado con OS.



**Figura 4.7** Espectros de T(%) y R(%) de películas delgadas de CuS depositadas sobre hojas de PET con una duración de depósito de 2 y 4 h.

En la Tabla 4.3 se presentan los parámetros de T(%) y R(%) de los *avilcrasol* que se muestran en la Figura 4.7. No se observa una reducción notable en los parámetros ópticos entre las películas depositadas por 2 y 4 h, como en el caso de las PDS depositadas sobre vidrio. Como se menciona en el apéndice A, los parámetros ópticos de los *avilcrasol* están en función del espesor de las películas delgadas y generalmente aumentan con la duración del depósito y la temperatura del baño químico. Una razón posible de que no se haya alcanzado un espesor mayor en las películas delgadas de CuS sobre las hojas de PET, es la temperatura del baño químico, ya que estas películas se depositaron a una temperatura ambiente menor que las depositadas sobre vidrio claro.

Los resultados presentados en la Tabla 4.3 muestran que la diferencia entre utilizar en los envidriados arquitectónicos un vidrio claro de 3 mm de espesor y un *avilcrasol* que integra una película delgadas de CuS depositada por 4 h, es de un 50% aproximadamente en la región del visible y un 70% en la región del cercano infrarrojo.

**Tabla 4.3** Propiedades ópticas de los *avilcrasol* que integran películas delgadas de CuS depositadas sobre hojas de PET con y sin tratamiento superficial con organosilanos. Como comparación se muestran además los parámetros ópticos de un vidrio claro de 3 mm de espesor y de un vidrio laminado sencillo.

Tipo de elemento	T <sub>UV</sub>	R <sub>UV</sub>	T <sub>VIS</sub>	R <sub>VIS</sub>	T <sub>CIR</sub>	R <sub>CIR</sub>	T <sub>SOL</sub>	R <sub>SOL</sub>	A <sub>SOL</sub>
Vidrio claro de 3 mm espesor	66.3	8.2	88.7	8.9	77.1	8.0	82.0	8.5	9.5
V / PVB / V	0.04	5.9	86.6	9.5	69.1	8.0	73.7	8.7	17.6
V / PVB / PET / PVB / V	0.00	5.7	85.9	9.9	65.4	7.9	71.3	8.8	19.9
V / PVB / PET OS / PVB / V	0.00	5.7	85.9	9.8	65.5	8.0	71.3	8.8	19.9
V / PVB / PET-CuS 2h / PVB / V	0.00	5.7	47.5	8.9	13.1	22.9	23.8	15.2	61.0
V / PVB / PET OS-CuS 2h / PVB / V	0.00	5.7	41.7	10.3	10.8	22.4	21.6	15.7	62.8
V / PVB / PET-CuS 4h / PVB / V	0.00	5.7	37.5	9.6	9.1	23.3	18.9	16.0	65.2
V / PVB / PET OS-CuS 4h / PVB / V	0.00	5.7	37.5	8.3	8.1	23.8	18.1	15.9	66.0

Es en ésta última región donde se concentra la mayor parte del calor contenido por la incidencia de radiación solar. Por su parte, la absorción de calor aumenta de 9.5% para un vidrio claro de 3 mm de espesor a 66% para un *avilcrasol* que integra películas delgadas de CuS depositadas por 4 h sobre PET. Esto último es una ventaja, ya que la

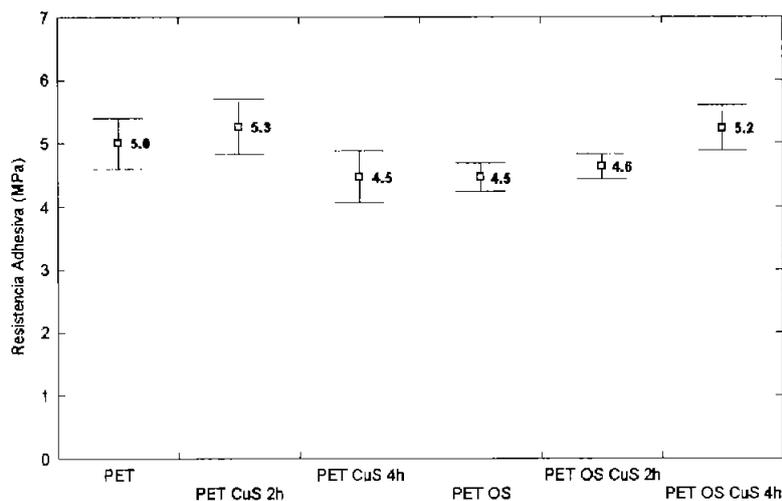
mayor parte de ésta energía absorbida se disipa hacia el exterior debido a la diferencia de valores de los coeficientes convectivos de transferencia de calor,  $h_o = 23 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  y  $h_i = 8 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ , siempre y cuando el gradiente de temperaturas no sea muy grande. Por ejemplo, si se tiene una temperatura de  $18^\circ\text{C}$  en el interior y una temperatura de  $32^\circ\text{C}$  en el exterior, la mayor parte del calor se transfiere al interior de la habitación. Para reducir la ganancia térmica en este caso, la velocidad del viento y por tanto el coeficiente convectivo de transferencia de calor en el exterior deben aumentarse. Esta característica se puede presentar al utilizar los *avilcrasol* en las ventanillas laterales de vehículos de transporte colectivo, ya que al aumentar la velocidad se reduce la ganancia térmica al interior de la unidad a causa del incremento de  $h_o$ .

#### 4.6.2 Caracterización Mecánica

En este apartado se presentan los resultados obtenidos en la caracterización mecánica de los *avilcrasol* que integran PDS de CuS depositadas sobre PET. La selección de las probetas y el desarrollo de las pruebas de resistencia adhesiva se llevaron a cabo de la misma forma en que se reportó en el Capítulo 3. Los elementos que componen el *avilcrasol* se muestran en la Figura 4.1 y son vidrio / PVB / PET+CuS / PVB / vidrio. Como se ha mencionado anteriormente en este Capítulo, se utilizaron hojas de PET tratadas superficialmente con una solución de organosilanos, trabajo que fue reportado por López-Mata [3]. Sobre éstas hojas de PET se depositaron películas delgadas de CuS, además se utilizaron también hojas de PET sin tratamiento superficial como referencia.

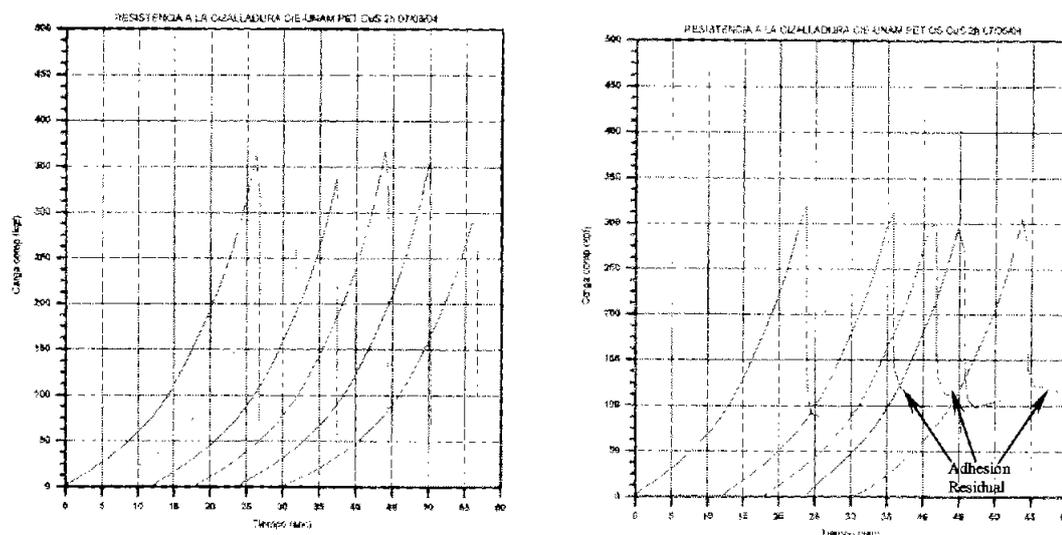
La Figura 4.8 muestra la resistencia adhesiva o adhesión máxima de los *avilcrasol* mencionados anteriormente. Se observa que la resistencia adhesiva, expresada en MPa, se reduce considerablemente en comparación con los *avilcrasol* reportados en el Capítulo 3. Los valores de resistencia adhesiva mostrados en la Figura 4.8 no presentan una variación significativa, por lo que se puede inferir que pertenece a una misma población, es decir, los tratamientos superficiales con OS aplicados a las hojas de PET no mejoró la resistencia adhesiva de los *avilcrasol*.

A pesar de que no hubo cambios significativos en la resistencia adhesiva de los *avilcrasol*, y que en todos los casos la película de CuS permaneció adherida al PET, se presentó un fenómeno muy interesante. Los *avilcrasol* que integran hojas de PET con tratamiento superficial con OS, muestran una resistencia adhesiva “residual”, es decir, la carga aplicada llega a un valor máximo (350-450 kgf) después del cuál cae abruptamente (100 kgf aproximadamente) y continua aplicándose establemente hasta que se debe detener el ensayo manualmente. Esto significa que el *avilcrasol* esta en condiciones de soportar la carga, por mínima que ésta sea, sin separarse completamente. Se infiere que este fenómeno se debe a que la interfase más débil, y donde ocurre la falla es la de PVB/PET (ver Figura 4.1), y como ambos polímeros son elásticos, se presentan grandes deformaciones antes de ocurrir la separación completa de los dos elementos.



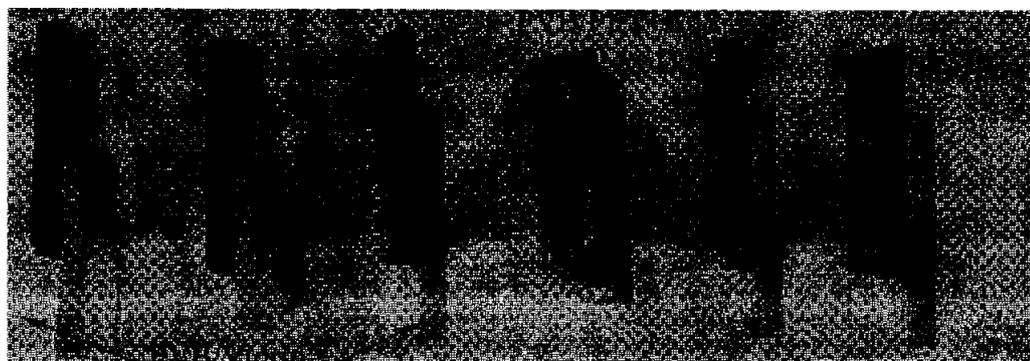
**Figura 4.8** Resistencia adhesiva máxima de los *avilcrasol* que integran hojas de PET con PDS de CuS. Se utilizaron hojas de PET con y sin tratamiento superficial con organosilanos.

En el caso de los *avilcrasol* que integran PET sin tratamiento superficial, se observa una caída abrupta de la carga aplicada, alcanzando valores de hasta 75 kgf. En éste punto el ensayo se detiene automáticamente, al no registrar una resistencia a la carga aplicada. Este comportamiento se observa sistemáticamente en éste tipo de *avilcrasol*, las Figuras 4.9 (a) y 4.9 (b) la diferencia entre las curvas de carga de los *avilcrasol* con PET sin y con tratamiento superficial respectivamente.



**Figura 4.9** Curvas representativas de las pruebas de resistencia adhesiva realizadas a los *avilcrasol* que integran hojas de PET depositadas con PDS de CuS por 2 h. **(a)** PET sin tratamiento superficial y **(b)** PET con tratamiento superficial con organosilanos.

En la Figura 4.10 se puede observar las interfases de falla de los *avilcrasol* después de terminada la prueba de resistencia adhesiva por corte-compresivo. En todos los casos se observa que las PDS depositadas sobre el PET permanecen adheridas al mismo, aún cuando éste no tiene tratamiento superficial. Cabe mencionar que los *avilcrasol* evaluados mecánicamente en el apartado 4.5 de éste Capítulo, se fabricaron con un PVB diferente al utilizado para los mostrados en la Figura 4.10, de aquí las diferencias en los valores de resistencia adhesiva máxima.



**Figura 4.10** En ésta fotografía se muestran las interfases de falla de los *avilcrasol* que integran hojas de PET sin tratamiento superficial. Se observa que todas se separaron completamente durante la prueba de adhesión por corte-compresivo.

## 4.7 Conclusiones

En éste Capítulo se reportan las características ópticas y mecánicas de vidrios laminados que integran hojas de PET con PDS de CuS depositadas por 2 y 4 h. A las hojas de PET se les aplicó un tratamiento superficial con una solución de organosilanos para mejorar la adhesión de las PDS a la superficie éstas. La resistencia adhesiva máxima de los *avilcrasol* con PET con y sin tratamiento superficial fue prácticamente la misma, alcanzando valores de hasta 5 MPa. Comparados con los valores de adhesión de un vidrio laminado sencillo, simple o doble, reportados en el Capítulo 3, los *avilcrasol* evaluados en éste Capítulo muestran una reducción en la resistencia adhesiva de aproximadamente un 50%. Esto se debe en gran medida a la pobre adhesión entre las hojas de PVB y las de PET, ya que fue en éstas interfases en donde se presentó la falla.

Se encontró que los *avilcrasol* con PET tratado superficialmente presentan una resistencia adhesiva “residual”, la cuál permite que las interfases del mismo queden adheridas, aún cuando éste haya fallado bajo esfuerzo cortante, dadas las características mecánicas de ambos polímeros. Las características ópticas de los *avilcrasol* aquí reportados son muy similares a las reportadas en el Capítulo 2. El tiempo y la temperatura del depósito químico son factores fundamentales para obtener un mayor espesor de la PDS de CuS, y generalmente con mejores características ópticas.

Aún cuando la resistencia adhesiva de estos *avilcrasol* fue de 5 MPa aproximadamente, su comportamiento al impacto de proyectiles arrastrados por el viento durante una tormenta tropical o huracán, y que se reporto en el Capítulo 2, los hace confiables para su aplicación en envidriados arquitectónicos, además de que proporcionan ahorro de energía al reducir la entrada de la radiación solar el interior del edificio.

**Bibliografía**

1. Aguilar J O, García U D, Pliego O E, Gómez-Daza O, Nair M T S y Nair P K, **Películas delgadas de CuS y CuS-CuSe sobre PET para fabricación de vidrios laminados controladores de la radiación solar**, *Memorias XXV Semana Nacional de Energía Solar*, ANES, 1-5 oct. 2001, San Luis Potosí, S. L. P.
2. Pantelides C P, Horst A D and Minor J E, **Postbreakage behaviour of heat strengthened laminated glass under wind effects**, *J. of Structural Engineering*, **119**, No. 2 81993) 454.
3. López-Mata C, **Modificaciones de las superficies de los sustratos para el mejoramiento de la adhesión de películas delgadas semiconductoras para su uso en los dispositivos de conversión de energía solar y de ahorro de energía**, *Tesis de Maestría*, Instituto Tecnológico de Cd. Madero, marzo de 2003.
4. ISO 9050:2003, **Standard Test Method: Glass in building – Determination of light transmittance, solar direct transmittance, total solar energy transmittance, ultraviolet transmittance and related glazing factors**.

# **CAPÍTULO 5**

## **CRITERIOS DE SELECCIÓN DE LOS AVILCRASOL**

En este capítulo se presentan los criterios de selección de los *avilcrasol* con base en sus propiedades ópticas, mecánicas y de transferencia de calor, para su aplicación en edificaciones ubicadas en regiones geográficas de clima cálido y expuestas a fenómenos climatológicos como huracanes o tormentas tropicales. Se analiza además, el beneficio del uso de los *avilcrasol* en vehículos de transporte colectivo. Las características ópticas y mecánicas de los diferentes *avilcrasol*, evaluadas en los Capítulos 3 y 4 se complementan en este Capítulo con los parámetros térmicos, para proponer los criterios de selección de los *avilcrasol*. Para el análisis térmico de los *avilcrasol* se utilizaron parámetros estandarizados [1] que fueron introducidos en los programas de cómputo reportados por Xamán [2] para el cálculo del coeficiente de sombreado (SC) y el coeficiente de ganancia de calor solar (SHGC). Se presenta también la clasificación de los *avilcrasol* desarrollados en este trabajo con sus características ópticas, mecánicas y térmicas, así como recomendaciones para su aplicación en edificaciones y automóviles, de acuerdo a su ubicación geográfica.

## 5.1 Generalidades

La geometría solar es uno de los elementos más importantes dentro del proceso de diseño arquitectónico, ya que a través del conocimiento del comportamiento de la trayectoria de los rayos solares, tanto en su componente térmica como lumínica, se logra dar la orientación óptima al edificio, la mejor ubicación de los espacios interiores de acuerdo a su uso, y se pueden diseñar de manera adecuada las aberturas y dispositivos de **control solar**, logrando efectos directos de calentamiento, enfriamiento e iluminación, traducibles en términos de confort humano y ahorro de energía [3].

Para poder seleccionar un vidrio de control solar adecuado a la región geográfica de ubicación de la edificación, es necesario conocer las condiciones climatológicas del lugar, como son velocidad de viento, temperatura, humedad relativa, así como también la radiación solar máxima durante el año. Otro factor importante es la ubicación del edificio, es decir, la orientación que tendrán los envidriados. Si éstos estarán expuestos a la radiación solar directa la mayor parte del tiempo, se sugieren valores de transmitancia en la región del visible ( $T_{vis}$ ) de 20% a 30% y una reflectancia en la misma región ( $R_{vis}$ ) menor al 10% para evitar deslumbramientos al entorno. Si el envidriado estará expuesto solo a la radiación difusa, se sugieren valores de  $T_{vis}$  de aproximadamente 50%. Estos valores se sugieren para edificaciones ubicadas en climas cálidos.

Con las características ópticas de los *avilcrasol*, citadas en los Capítulos 3 y 4, se determinaron los parámetros térmicos que permiten evaluar la ganancia de calor solar a través de los mismos. Estos parámetros (SC y SHGC) se basan únicamente en la ganancia total de calor solar a través del envidriado, que incluye la radiación solar transmitida en ambas direcciones y el flujo de calor hacia el interior como resultado del calentamiento del envidriado por la absorción óptica [4]. Este valor tiene un efecto directo en el consumo de energía para el acondicionamiento del aire en edificios y/o automóviles y en la capacidad de los sistemas de enfriamiento. En los resultados

presentados en éste Capítulo se muestra los lugares posibles de aplicación de los *avilcrasol* de acuerdo a sus características ópticas, térmicas y mecánicas.

## 5.2 Correlación de las Propiedades Ópticas y Térmicas

Como se mencionó en el Capítulo 1, existe una estrecha relación entre las propiedades ópticas y térmicas de los *avilcrasol*, porque con el valor de la absorptancia total ( $\alpha$ ) es posible determinar los valores del coeficiente de sombreado (CS) y el coeficiente de ganancia de calor solar (SHGC), así como también la ganancia de luz solar (en inglés LSG). Para determinar el SC de los *avilcrasol* se utilizaron los parámetros estándar para evaluar envidriados verticales citados en la norma ISO 9050:2003, y éstos se mencionan en el apéndice A.

Para el balance térmico se utilizaron modelos matemáticos unidimensionales en estado transitorio, que permiten evaluar el comportamiento térmico de vidrios laminados simples, con películas delgadas semiconductoras depositadas sobre vidrio (Capítulo 3) y depositadas sobre PET (Capítulo 4), para el control de la radiación solar. Los modelos anteriores fueron desarrollados por Estrada [5,6] y Álvarez [7-8, 10-12], así mismo, Flores [9] y Xamán [2] utilizando éstos como base, desarrollaron modelos similares para evaluar térmicamente cavidades cuadradas con vidrios con películas de control solar. Durante el desarrollo de éste trabajo de tesis se utilizaron diferentes configuraciones de vidrios laminados o *avilcrasol*, pero se tomaron sólo los más representativos para su evaluación óptica, térmica y mecánica en conjunto.

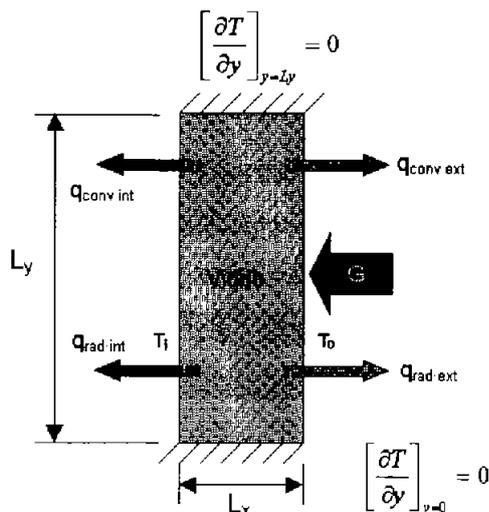
La Tabla 5.1 muestra las propiedades ópticas y térmicas de los *avilcrasol* desarrollados en esta investigación. Los valores de Transmitancia óptica ( $\tau$ ), Reflectancia especular ( $\rho$ ) y Absorptancia ( $\alpha$ ) se tomaron de los *avilcrasol* evaluados en los Capítulos 3 y 4. La redistribución de la radiación solar absorbida por el *avilcrasol* se calculó como función del coeficiente convectivo de transferencia de calor ( $h$ ).

**Tabla 5.1** Parámetros ópticos y térmicos de los componentes de un *avilcrasol* [10].

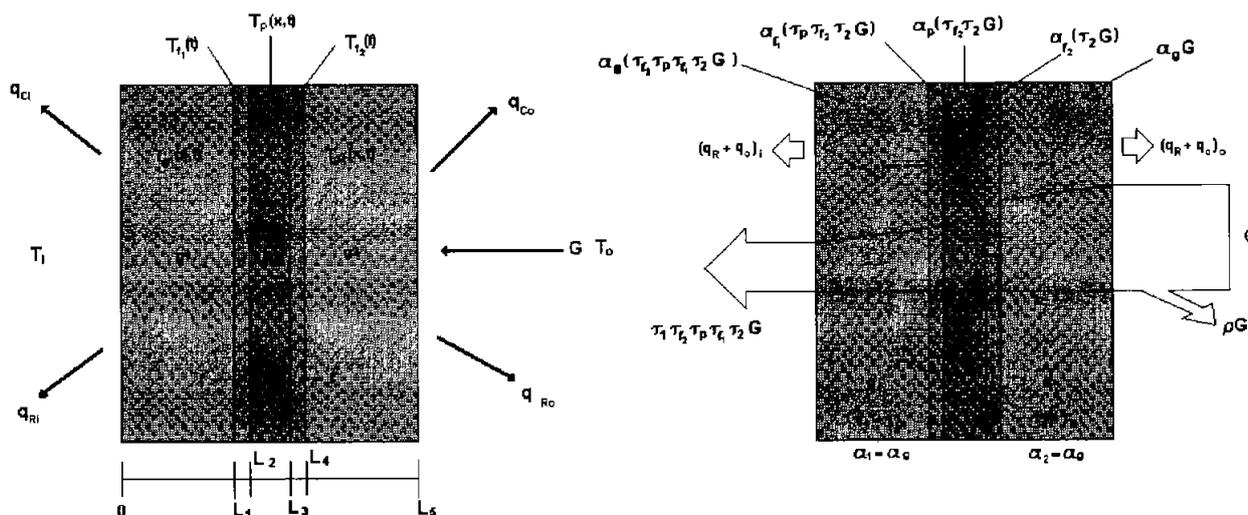
Vidrio (3 mm)	Hoja de PVB	PDS (CuS, CuS-Cu <sub>2-x</sub> Se)	<i>Avilcrasol</i> sin PDS	<i>Avilcrasol</i> con PDS
Propiedades ópticas				
$\alpha = 0.094$	$\alpha = 0.062$	$\alpha = 0.40 - 0.62$	$\alpha = 0.18$	$\alpha = 0.61 - 0.826$
$\rho = 0.85$	$\rho = 0.094$	$\rho = 0.19 - 0.30$	$\rho = 0.09$	$\rho = 0.09 - 0.15$
$\tau = 0.82$	$\tau = 0.845$	$\tau = 0.14 - 0.39$	$\tau = 0.73$	$\tau = 0.10 - 0.24$
$\epsilon_g = 0.837$				
Propiedades térmicas				
$K_g = 1.4 \text{ W / mK}$	$K_p = 0.70 \text{ W / mK}$	$K_a = 26.3 \times 10^{-3} \text{ W / mK}$		
$Cp_g = 840 \text{ kJ / kg K}^1$	$Cp_p = 2.100 \text{ kJ / kg K}^1$	$Cp_a = 1.012 \text{ kJ / kg K}^1$		
Densidad 2700 kg/m <sup>3</sup>	Densidad 1118 kg/m <sup>3</sup>	Densidad 1.204 kg/m <sup>3</sup>		
$\delta_g = 6.17 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$	$\delta_p = 2.98 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$	$\nu = 15.89 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$		

### 5.2.1 Balance Térmico en los *Avilcrasol* Utilizados

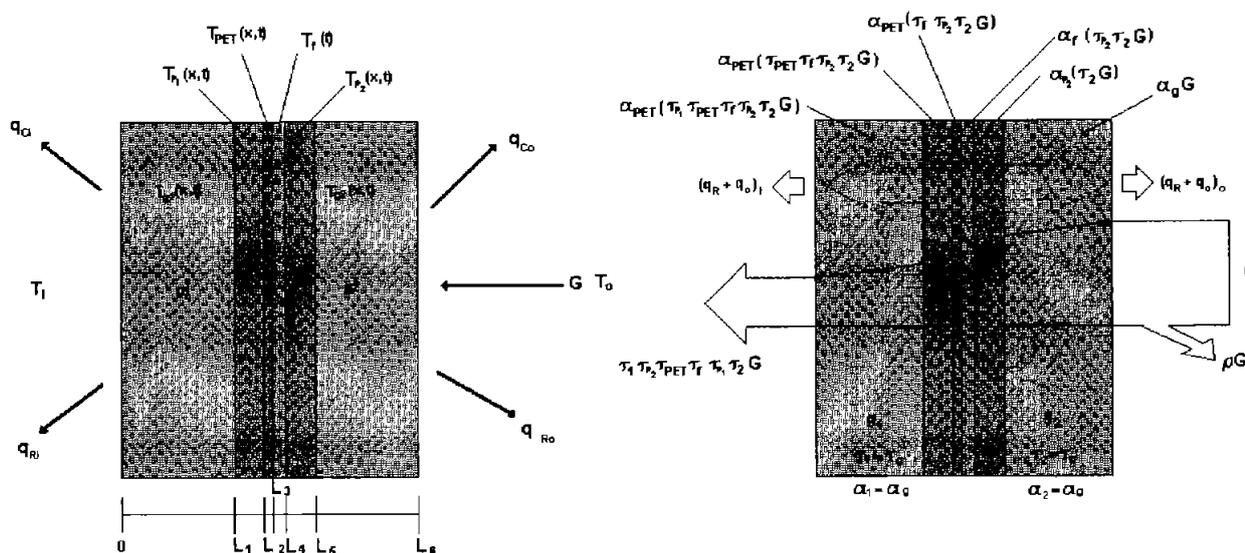
Las Figuras 5.1, 5.2 y 5.3 muestran los modelos físicos de los vidrios a evaluar. Para calcular la distribución de temperaturas al interior y exterior de un vidrio laminado con película de control solar, se considera el balance diferencial de energía en un vidrio claro monolítico (Figura 5.1) o un vidrio laminado de varias capas (Figura 5.2 y 5.3), según sea la configuración para análisis, donde la temperatura exterior  $T_o$  esta en función de las condiciones ambientales y la temperatura  $T_i$  es la temperatura en el interior.



**Figura 5.1** Radiación térmica y transmitancia de energía solar en un vidrio monolítico de 3 mm de espesor.



**Figura 5.2** Radiación térmica y transmitancia de energía solar en un *avilcrasol* que integra dos películas delgadas semiconductoras de CuS, ZnS-CuS, CuS-Cu<sub>2-x</sub>Se o ZnS-CuS-Cu<sub>2-x</sub>Se depositadas químicamente.



**Figura 5.3** Radiación térmica y transmitancia de energía solar en un *avilcrasol* que integra una película delgada semiconductor de CuS, ZnS-CuS, CuS-Cu<sub>2-x</sub>Se o ZnS-CuS-Cu<sub>2-x</sub>Se depositada químicamente sobre una hoja de PET.

Discretizando y resolviendo las ecuaciones que gobiernan el fenómeno físico, que en este caso es la ecuación de conducción de calor, se puede calcular la transferencia de calor a través de éstos *avilcrasol* con las configuraciones mostradas anteriormente. La metodología para la solución del problema físico de conducción de calor para diferentes

configuraciones de vidrios con películas de control solar, se presentan en [2, 5-12]. En éstos modelos se considera la radiación solar incidente en forma normal al vidrio con un valor constante de AM1.5 ( $850 \text{ W/m}^2$ ), de acuerdo a la norma ISO 9050:2003 [1], con la cual se pesaron las propiedades ópticas de los *avilcrasol*. Cabe hacer mención que los cambios significativos en la cantidad de calor transmitido a través de un envidriado, ocurren a partir de ángulos de incidencia mayores a  $60^\circ$  respecto al zenit [13].

Como se mencionó en el apartado 1.3.7, se utilizaron los valores citados en [1] para los coeficientes convectivos de transferencia de calor para el interior ( $8 \text{ W/m}^2\text{K}$ ) y exterior ( $23 \text{ W/m}^2\text{K}$ ), así como un valor para la emitancia de 0.837, tanto para el interior como el exterior. Una vez definidos los parámetros ópticos y térmicos de los modelos matemáticos, se introdujeron como datos a los programas de cómputo [2] de cada configuración y se evaluaron los balances térmicos. La Tabla 5.2 muestra las características ópticas y térmicas de los diferentes tipos de *avilcrasol* utilizados en este proyecto de tesis.

El Departamento de Energía de los Estados Unidos de Norteamérica [4] cita que las variables más importantes en el funcionamiento de los envidriados espectralmente selectivos son el SHGC y la transmitancia de luz visible ( $T_{\text{VIS}}$ ). El SHGC es una medida de la ganancia total de calor solar, que incluye la radiación solar directa transmitida al interior y el flujo de calor al interior, producto de la absorción de la radiación del envidriado. La transmitancia de luz por su parte, es una medida del porcentaje (0 – 100%) de la luz visible que se transmite a través del envidriado, por tanto, valores bajos (menos del 10%) de transmitancia de luz, requieren el uso de iluminación artificial durante el día para el desempeño de labores [14].

Esta definición se acuñó debido a que existen envidriados espectralmente selectivos que tienen un SHGC muy bajo (menos de 0.5), pero reducen la  $T_{\text{VIS}}$  considerablemente, en ocasiones con valores menores a 10%, y esto ocasiona que se tenga que utilizar iluminación artificial en el interior de la edificación y ello pone en duda su objetivo de ahorro de energía. De esta manera se puede definir un vidrio espectralmente selectivo

como aquel que tiene una transmitancia en el visible alta y un SHGC bajo (menor a 0.5). Otro factor adicional para la evaluación de filtros solares es el LSG, que es el cociente de la transmitancia de luz entre el SHGC, el cual se toma como una medida de la reducción de la carga térmica al interior, sin sacrificar la entrada de luz visible.

**Tabla 5.2** Propiedades ópticas de los diferentes *avilcrasol* desarrollados durante esta investigación.

Tipo de <i>avilcrasol</i>		Referencia	$\tau_{\text{sol}}$	$\rho_{\text{sol}}$	$\alpha_{\text{sol}}$	SC	SHGC	LSG
1	Vidrio 3 mm espesor	Tabla 4.3	0.82	0.085	0.095	1	0.87	0.97
2	Vidrio (v) /PVB / Vidrio (v)	Tabla 3.1	0.732	0.087	0.177	0.77	0.89	0.97
3	v/ZnS80nm/PVB/ZnS80nm/v	Tabla 3.1	0.737	0.088	0.176	0.80	0.92	0.94
4	V/CuS100nm/PVB/CuS100nm/v	Tabla 3.1	0.22	0.117	0.662	0.55	0.63	0.62
5	V/ZnS-CuS100nm/PVB/CuS100nm-ZnS/v	Tabla 3.1	0.194	0.128	0.678	0.53	0.61	0.59
6	V/CuS150nm/PVB/CuS150nm/v	Tabla 3.1	0.099	0.13	0.772	0.48	0.55	0.40
7	V/ZnS-CuS150nm/PVB/CuS150nm-ZnS/v	Tabla 3.1	0.102	0.134	0.764	0.48	0.55	0.42
8	V/CuS100nm-Cu <sub>2-x</sub> Se/PVB/Cu <sub>2-x</sub> Se-CuS100nm/v	Tabla 3.2	0.18	0.123	0.697	0.53	0.61	0.46
9	V/ZnS-CuS(150nm)- Cu <sub>2-x</sub> Se /PVB/Cu <sub>2-x</sub> Se - CuS-ZnS(150nm)/v	Tabla 3.2	0.147	0.15	0.703	0.50	0.58	0.49
10	V/CuS(150nm)- Cu <sub>2-x</sub> Se /PVB/CuS-Cu <sub>2-x</sub> Se (150nm)/v	Tabla 3.2	0.084	0.09	0.826	0.47	0.54	0.32
11	V/ZnS-CuS(200nm)- Cu <sub>2-x</sub> Se /PVB/Cu <sub>2-x</sub> Se -CuS-ZnS(200nm)/v	Tabla 3.2	0.089	0.147	0.764	0.46	0.53	0.32
12	Vidrio/PVB/PET/PVB/vidrio	Tabla 4.1	0.713	0.088	0.199	0.77	0.89	0.97
13	V/PVB/PET-CuS 2h/PVB/v	Tabla 4.3	0.238	0.152	0.610	0.55	0.63	0.76
14	V/PVB/PET-CuS 4h/PVB/v	Tabla 4.3	0.189	0.160	0.652	0.52	0.60	0.63

### 5.3 Criterios de Selección de los *Avilcrasol* de acuerdo a la Zona Geográfica de Aplicación

Como se mencionó en el apartado 5.1, para determinar que tipo de *avilcrasol* a utilizar de acuerdo a la ubicación geográfica de aplicación, es necesario conocer la radiación solar en esa región, además de otros factores climatológicos como la velocidad máxima del viento durante el año, humedad relativa, etc. La selección de las ciudades en donde

se propone utilizar los *avilcrasol* es con base en la radiación solar incidente en cinco regiones geográficas del país, las cuales se eligieron porque son representativas de todo el territorio nacional, además de que todas ellas se ubican en zonas costeras, donde los fenómenos climatológicos, como tormentas y huracanes están presentes año con año. Las ciudades que se eligieron son: Acapulco Guerrero; Cancún, Quintana Roo; Huatulco, Oaxaca; Tampico, Tamaulipas y Tijuana, Baja California, las cuales se muestran en la Figura 5.4.



Figura 5.4 Ubicación geográfica de las ciudades seleccionadas para instalar los *avilcrasol*.

### 5.3.1 Geometría Solar

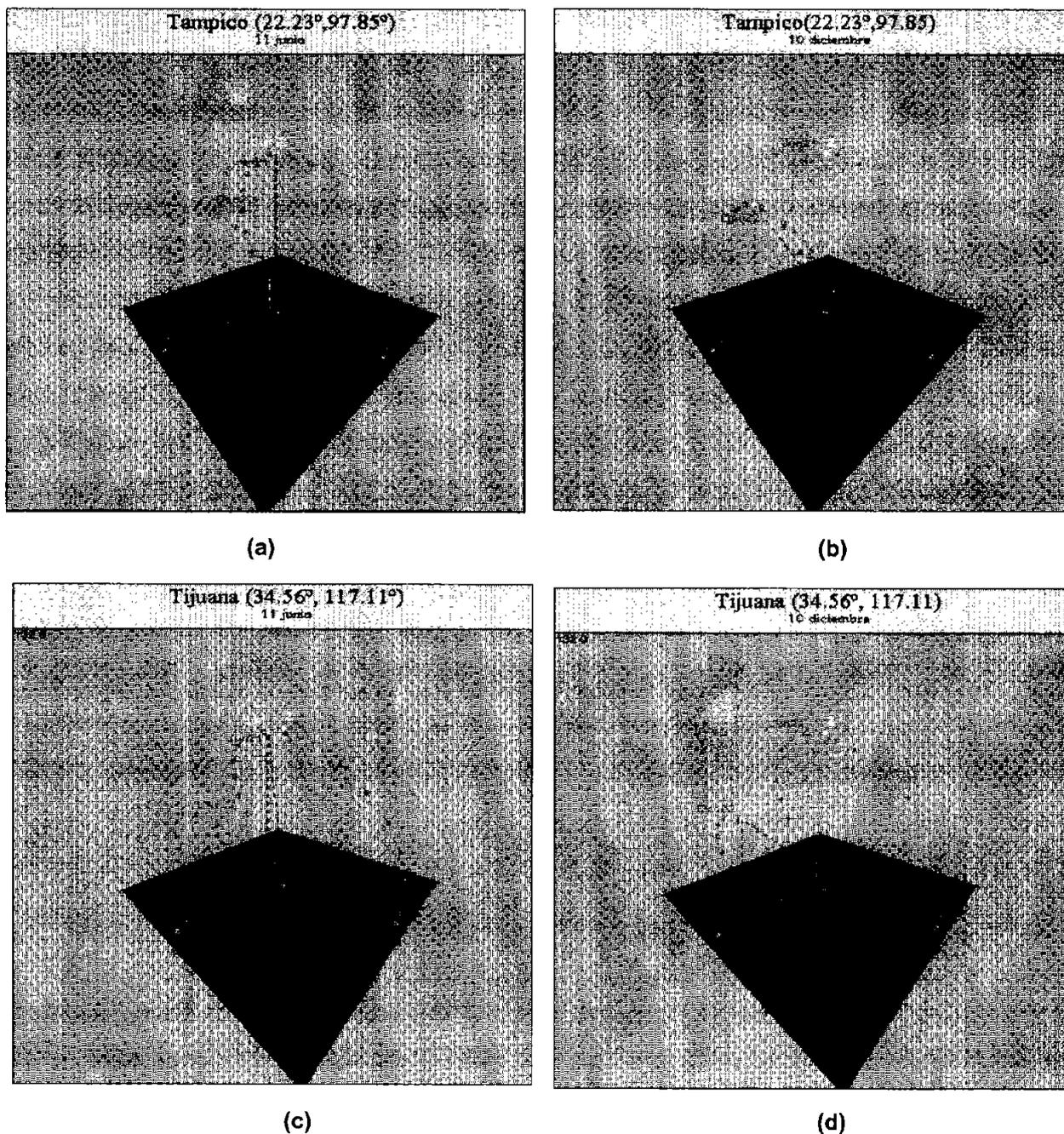
Para determinar la radiación solar en las ciudades arriba mencionadas, se utilizó un Software comercial (SunPlot3D) que sirve como herramienta para el diseño de sistemas fotovoltaicos, ya que con éste se puede determinar la radiación solar que incide en una superficie horizontal y en el módulo fotovoltaico. La inclinación del módulo se puede variar de  $0^\circ$  a  $90^\circ$  respecto a la horizontal y de  $0^\circ$  a  $180^\circ$  respecto al acimut. Al introducir las coordenadas geográficas de la ciudad de interés, así como la orientación e

inclinación del módulo, el software proporciona una estimación de la radiación solar incidente, el ángulo acimutal, el ángulo horario, la declinación solar, la masa de aire, etc. Con el propósito de tener valores de radiación solar representativos de cada zona geográfica en específico, se tomaron los días que representan el promedio de la radiación solar incidente, ver apéndice D. La orientación de la superficie vertical para las cinco ciudades fue hacia el sur.

En la Tabla D.1 del Apéndice D se presentan las coordenadas geográficas de las ciudades elegidas para aplicar los *avilcrasol*, la fecha, la radiación solar incidente sobre una superficie vertical, el ángulo acimutal y la declinación solar.

Todos los valores de radiación solar mostrados en la Tabla D.1 se obtienen con un ángulo acimutal de  $0^\circ$  o de  $180^\circ$ , de acuerdo al mes del año y la ubicación de la ciudad. La Figura 5.5 (a) – (d) muestra la trayectoria solar para los días 11 de junio y 10 de diciembre en la ciudad de Tampico ( $22.23^\circ$ ,  $97.85^\circ$ ) y Tijuana ( $34.56^\circ$ ,  $117.11^\circ$ ). Para la ciudad de Tampico, se observa que el día 10 de diciembre es cuando se presenta la mayor incidencia de radiación solar ( $735 \text{ W/m}^2$ , AM1.41) sobre la superficie vertical y el día 11 de junio la incidencia solar es en la parte posterior (desde el norte) de la superficie vertical, es decir, los valores de radiación solar corresponden solo a la parte difusa ( $122 \text{ W/m}^2$ , AM1) de ésta. Tijuana por su parte, tendrá incidencia de la radiación solar durante todo el año en las superficies verticales orientadas hacia el sur, como se observa en la Figura 5.5 (c).

Para las ventanas orientadas hacia el norte, en edificaciones ubicadas al sur del trópico de Cáncer ( $23^\circ$  aproximadamente), se sugiere utilizar *avilcrasol* con valores de transmitancia óptica en la región del visible de 50 a 60%, porque éstas solo tendrán incidencia de radiación difusa y no directa. Para las ventanas orientadas hacia el sur, se sugiere utilizar *avilcrasol* con valores de transmitancia óptica en la región del visible de 20 a 40%, esto con el propósito de reducir la carga térmica y permitir la entrada de la luz del día a la edificación, y con esto ahorrar energía por concepto de acondicionamiento del aire e iluminación artificial.



**Figura 5.5** Trayectoria solar para los días 11 de junio, (a) y (c) y 10 de diciembre (b) y (d) en las ciudades de Tampico y Tijuana respectivamente.

Los valores de incidencia de radiación solar presentados en la Tabla D.1, dan la pauta para la selección de los *avilcrasol* en cualquiera de las cinco ciudades mencionadas anteriormente. Es decir, con base en la radiación solar incidente, se selecciona el vidrio

adecuado, de acuerdo a su configuración y capacidad de control solar, tanto para ventanas ubicadas al sur como al norte.

### **5.3.2 Resistencia de los *Avilcrasol* a los Fenómenos Climatológicos**

El objetivo principal de este trabajo de investigación es desarrollar vidrios laminados con películas espectralmente selectivas para el control de la radiación solar, que además ofrezcan características mecánicas suficientes para resistir los embates de los fuertes vientos ocasionados por tormentas tropicales o huracanes. Una tormenta tropical se define como un ciclón tropical con vientos que alcanzan velocidades de 60 a 117 km/h, y un huracán se define como un ciclón tropical con vientos mayores a 118 km/h [15]. Estos fenómenos climatológicos generalmente son típicos de regiones geográficas ubicadas en las zonas costeras, sin embargo no se descarta que puedan llegar tan lejos tierra adentro, como el caso del Huracán Alicia que azotó la ciudad de Houston, Texas en 1983 [16] o del Gilberto que azotó la ciudad de Monterrey en 1988 causando graves daños materiales.

La magnitud de los Huracanes se estima mediante la escala Saffir-Simpson [17], desarrollada por los científicos estadounidenses Herbert Saffir y Robert Simpson, ya que es la forma más aceptada para “categorizarlos” y sirve para estimar los daños que pueden ocasionar. De acuerdo a la escala de Saffir-Simpson, la clasificación de los Huracanes se muestra en la Tabla 5.3. En esta se observa que un Huracán con una escala Saffir-Simpson 5, alcanza más de 248 km/h, suficiente para derrumbar un edificio completo. No se considera la aplicación de los *avilcrasol* para estas situaciones extremas, dado que se colapsarían junto con el edificio. Se estima que los *avilcrasol* desarrollados en este trabajo de tesis pueden resistir los embates de un huracán categoría 3, siempre y cuando se utilicen anclajes especiales en los marcos de las ventanas.

Tabla 5.3 Clasificación de los Huracanes de acuerdo a la escala de Saffir-Simpson [17].

Categoría	Vel. Viento máxima (km/h)	Daños Ocasionados
1	118 - 152	Considerables daños a vegetación, árboles, follaje, viviendas sin cimientos y señalamientos mal construidos.
2	153 - 176	Caída de árboles, considerables daños en los techos de los edificios, ventanas y puertas.
3	177 - 208	Daños estructurales en edificios pequeños, derrumbe total de algunas viviendas pequeñas.
4	209 - 248	Derrumbe de los techos de muchas casas y fábricas.
5	Más de 248	Daños en cristales de puertas y ventanas. Derrumbe total de algunos edificios. Destrucción considerable.

La estimación anterior se hace con base en los resultados obtenidos en las pruebas de impacto realizadas a los *avilcrasol*, las cuales se citan en el Capítulo 3. Los *avilcrasol* utilizados en ese experimento se fabricaron con vidrio claro de 3 mm de espesor, y resistieron el impacto sin penetración de un proyectil de 2 g a una velocidad de 45 m/s (162 km/h). Cabe mencionar que los vidrios que se instalan en los edificios con grandes envidriados, utilizan vidrios de 6 mm de espesor como mínimo, es decir, si se fabrica un vidrio laminado con dos hojas de vidrio claro de 4 y 3 mm respectivamente, la resistencia mecánica aumenta.

### 5.3.3 Avilcrasol en Aplicaciones Automotrices

De acuerdo a las normas vigentes en la industria automotriz [18], el parabrisas de un automóvil debe tener una transmitancia óptica en la región del visible no menor a 75%. Por esta razón, se propone el uso de los *avilcrasol* solo a los vidrios laterales, tanto a vehículos compactos, como a vehículos de transporte colectivo de pasajeros (autobuses). El coeficiente convectivo de transferencia de calor tiene una influencia directa en la carga térmica al interior de la habitación o el vehículo, ya que éste es proporcional a la velocidad del viento en el exterior. Se cita en [6] que una buena aproximación del coeficiente convectivo de transferencia de calor se puede determinar de la siguiente expresión:

$$h = 2.8 \pm 3.0v \tag{5.1}$$

Donde  $v$  es la velocidad del viento en m/s y  $h$  esta dada en  $W/m^2K$ .

Al aumentar el coeficiente convectivo en la parte exterior del envidriado, se tendrá una reducción del SC, SHGC y la ganancia de calor al interior. La Tabla 5.4 muestra el cambio en los parámetros antes mencionados respecto al coeficiente convectivo de transferencia de calor, para tres de los catorce *avilcrasol* presentados en la Tabla 5.2. Se observa de esta Tabla, que en el *avilcrasol* con PDS integrada (*avilcrasol* 2), no se modifican el SC y el SHGC significativamente, esto porque al no haber suficiente absorción de calor ( $\alpha = 0.177$ ) el calor disipado por convección no es significativo. Por su parte, los *avilcrasol* que integran PDS presentan un cambio sustancial en los valores del SC y SHGC, dado que la absorción alcanza valores de 0.622 a 0.826, para el *avilcrasol* (4) y (10) respectivamente.

**Tabla 5.4** Variación del SC, SHGC y ganancia de calor al interior respecto al coeficiente convectivo de transferencia de calor al exterior

$h[W/m^2K]$	(1) Vidrio (v) /PVB / Vidrio (v)			(4) V/CuS100nm/PVB/CuS100nm/v			(10) V/CuS(150nm)- Cu <sub>2-x</sub> Se /PVB/CuS- Cu <sub>2-x</sub> Se (150nm)/v		
	SC	SHGC	$q_{in}$ ( $W/m^2$ )	SC	SHGC	$q_{in}$ ( $W/m^2$ )	SC	SHGC	$q_{in}$ ( $W/m^2$ )
23	0.77	0.89	754.20	0.55	0.63	537.86	0.47	0.54	458.10
33	0.77	0.89	752.29	0.53	0.61	519.26	.044	0.51	430.34
43	0.77	0.88	751.01	0.52	0.60	506.73	0.42	0.48	411.62
53	0.77	0.88	750.09	0.51	0.59	497.74	0.41	0.47	398.16
63	0.77	0.88	749.39	0.50	0.58	490.96	0.40	0.46	388.02
73	0.77	0.88	748.85	0.50	0.57	485.68	0.39	0.45	380.11
83	0.77	0.88	748.42	0.49	0.57	481.44	0.38	0.44	373.78
93	0.77	0.88	748.07	0.49	0.56	477.97	0.38	0.43	368.58
103	0.77	0.88	747.77	0.49	0.56	475.07	0.37	0.46	364.25

Este beneficio adicional se presenta en los vidrios de automóviles, dado que el coeficiente convectivo de transferencia de calor,  $h_o$ , varía constantemente durante el

movimiento del vehículo. Al aumentar la velocidad del vehículo, el  $h_o$  también aumenta. Este comportamiento se aprecia en la Figura 5.6, donde la carga térmica al interior del vehículo disminuye respecto al aumento de  $h_o$ . La Figura 5.7 muestra la variación del SHGC respecto al  $h_o$ , se observa que el comportamiento es similar al mostrado en la Figura 5.6. Este tipo de comportamiento térmico se ha reportado anteriormente para vidrios con filtros solares en diferentes configuraciones [10-12].

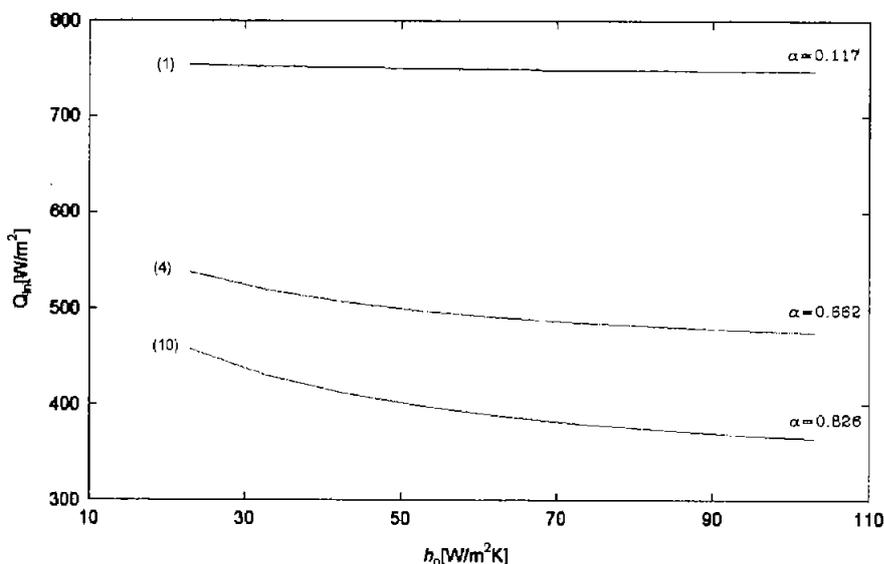


Figura 5.6 Variación de la carga térmica al interior respecto al coeficiente convectivo de transferencia de calor,  $h_o$  [AM1.5, 850 W/m²]

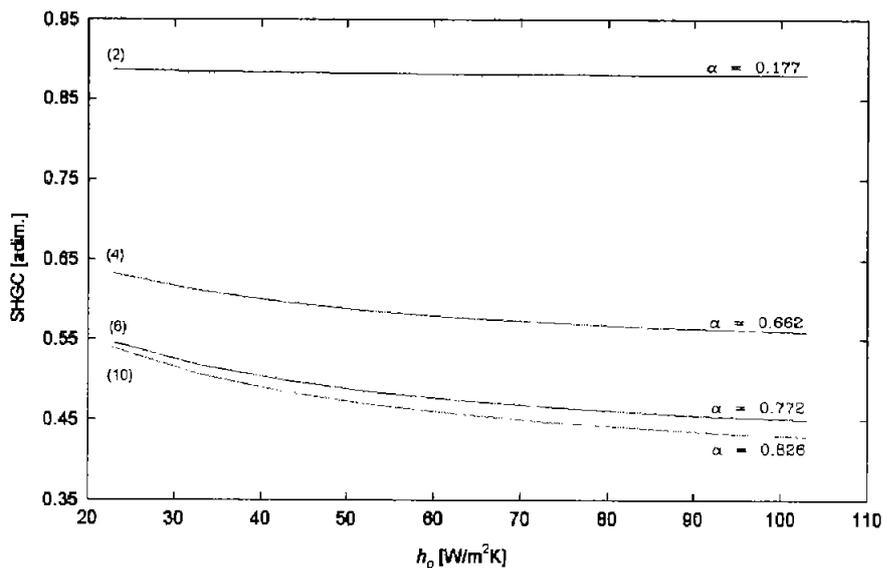


Figura 5.7 Variación del SHGC respecto al coeficiente convectivo de transferencia de calor,  $h_o$  [AM1.5, 850 W/m²]

## 5.4 Resultados y Discusión

Una vez conocidas las características ópticas, térmicas y mecánicas de los *avilcrasol* desarrollados en este proyecto de tesis, se tienen las bases necesarias para hacer propuestas de aplicación de los mismos, en edificaciones ubicadas en diferentes regiones geográficas de la República Mexicana. Como se mencionó anteriormente, las ciudades elegidas para la aplicación de los *avilcrasol* fueron cinco: Acapulco, Cancún, Huatulco, Tampico y Tijuana. Además se presentan propuestas de aplicación de los *avilcrasol* en vehículos de transporte colectivo.

Con base en la experiencia adquirida durante el desarrollo de este trabajo de tesis, se presenta en la tabla 5.5 una guía para la selección de los *avilcrasol* de acuerdo a la aplicación requerida. Esta puede servir como referencia al consultar la Tabla 5.6, donde se presentan los catorce *avilcrasol* desarrollados y caracterizados en este trabajo de tesis.

**Tabla 5.5** Guía para la selección de un *avilcrasol* con base en las características óptica, térmica y mecánica presentadas en este trabajo de tesis.

Aplicación	T <sub>vis</sub> (%)	SHGC	LSG	σ (MPa)
Arquitectura	10 – 30 P. S.*	0.3 – 0.5	0.33 – 0.60	7 – 14
	30 – 60 P. N. **	0.5 – 0.7	0.60 – 0.85	7 – 14
Automotriz	20 - 50	0.3 – 0.6	0.66 – 0.83	10 ± 2

\* Pared Sur, en ubicaciones menores a 24° de Latitud; \*\*Pared Norte, en ubicaciones menores a 24° de Latitud.

La Tabla 5.6 muestra las características ópticas, térmicas y mecánicas de los *avilcrasol* desarrollados en éste trabajo de investigación, así como la zona geográfica sugerida para su aplicación. Las características mecánicas que se muestran en la Tabla 5.6 están expresadas con base al esfuerzo cortante máximo que resiste el *avilcrasol* antes de presentarse la falla. En los Capítulos 3 y 4 se presentan los resultados de estas pruebas experimentales, de donde se tiene que la mayoría de los *avilcrasol* presentan valores de adhesión iguales o mayores a un vidrio laminado convencional.

Tabla 5.6 Características ópticas, térmicas y mecánicas de los avilcrasol desarrollados en ésta investigación

Tipo de avilcrasol	Referencia	$\tau_{sol}$	$\rho_{sol}$	$\alpha_{sol}$	SC	SHGC	$T_{vis}$	LSG	$\sigma_{max}$ [MPa]	Observaciones
1 Vidrio 3 mm espesor	Tabla 4.3	0.82	0.085	0.095	1	0.87	0.85	0.97	---	Se utiliza en ventana de casa, aumentando el espesor a 6 mm se puede aplicar en edificios con grandes áreas de ventanas.
2 Vidrio (v) /PVB / Vidrio (v)	Tabla 3.1	0.732	0.087	0.177	0.77	0.89	0.86	0.97	11.1	Se utilizan en bancos, puertas de acceso principal, techos inclinados y en parabrisas automotrices. Se recomienda su uso para proteger la integridad interior del edificio durante ataques vandálicos y fenómenos meteorológicos.
3 v/ZnS80nm/PVB/ZnS80nm/V	Tabla 3.1	0.737	0.088	0.176	0.80	0.92	0.86	0.94	12.4	Las características ópticas no difieren significativamente del anterior, además presenta mejor resistencia adhesiva. Se sugiere la misma aplicación que el anterior.
4 V/CuS100nm/PVB/CuS100nm/v	Tabla 3.1	0.22	0.117	0.662	0.55	0.63	0.39	0.62	12.7	Se recomienda su uso en edificaciones orientadas al norte, para las cinco ciudades propuestas, a excepción de Tijuana. Se estima una resistencia a huracanes categoría 3. El valor del LSG proporciona buena iluminación al interior. Presenta una tonalidad verde olivo. Se recomienda su uso en vehículos de transporte colectivo.
5 V/ZnS- CuS100nm/PVB/CuS100nm-ZnS/v	Tabla 3.1	0.194	0.128	0.678	0.53	0.61	0.36	0.59	14.7	Mismas características ópticas y térmicas que el anterior, pero con una resistencia adhesiva mayor. Se recomienda su aplicación en cualquiera de las ciudades propuestas. Proporcionan buena iluminación al interior en ventanas orientadas al sur. Pueden utilizarse también en vehículos.
6 V/CuS150nm/PVB/CuS150nm/v	Tabla 3.1	0.099	0.13	0.772	0.48	0.55	0.22	0.40	7.2	Se deben hacer estudios históricos sobre velocidades máximas de viento en la región de aplicación. Aunque la resistencia adhesiva es suficiente para la absorción de impactos, no se recomienda su uso en zonas costeras ni en vehículos.
7 V/ZnS- CuS150nm/PVB/CuS150nm-ZnS/v	Tabla 3.1	0.102	0.134	0.764	0.48	0.55	0.23	0.42	12.1	Presenta buenas características ópticas, térmicas y mecánicas. Se recomienda su aplicación en cualquiera de las ciudades propuestas aún si la ventana se orienta al sur. Se estima que puede soportar los embates de un huracán categoría 3 si se utilizan anclajes especiales. Se recomienda su uso en vehículos.
8 V/CuS100nm-Cu <sub>2</sub> Se/PVB/ Cu <sub>2</sub> Se-CuS100nm/v	Tabla 3.2	0.18	0.123	0.697	0.53	0.61	0.28	0.46	13.55	Se recomienda su uso en edificaciones orientadas al sur, en cualquiera de las ciudades propuestas. Se estima una resistencia a huracanes categoría 3. El valor del LSG permite una buena iluminación al interior. La película de Cu <sub>2</sub> Se proporciona una tonalidad dorada.

9	V/ZnS-CuS(150nm)- Cu <sub>2-x</sub> Se /PVB/ Cu <sub>2-x</sub> Se - CuS-ZnS(150nm)/v	Tabla 3.2	0.147	0.15	0.703	0.50	0.58	0.28	0.49	17.2	Presenta buenas características ópticas y térmicas, sin embargo su elevada resistencia adhesiva reduce la capacidad de absorción de energía, comportándose como un panel rígido, lo que implica que existen mayores probabilidades de ser atravesado por un proyectil contenido en el viento durante una tormenta tropical o huracán. No se recomienda su aplicación en vehículos.
10	V/CuS(150nm)- Cu <sub>2-x</sub> Se /PVB/CuS- Cu <sub>2-x</sub> Se (150nm)/v	Tabla 3.2	0.084	0.09	0.826	0.47	0.54	0.17	0.32	13.05	La T <sub>vis</sub> es muy baja, tal vez sea necesario el uso de iluminación artificial. Presenta buenas características térmicas y mecánicas. Se recomienda su uso en cualquiera de las ciudades propuestas y en vehículos.
11	V/ZnS-CuS(200nm)- Cu <sub>2-x</sub> Se /PVB/ Cu <sub>2-x</sub> Se -CuS-ZnS(200nm)	Tabla 3.2	0.089	0.147	0.764	0.46	0.53	0.20	0.38	12.6	Mismas recomendaciones que el anterior
12	Vidrio/PVB/PET/PVB/vidrio	Tabla 4.1	0.713	0.088	0.199	0.77	0.89	0.86	0.97	5.0	Este <i>avicrasol</i> solo se muestra como referencia para los dos siguientes. Su uso implica un costo adicional respecto al <i>avicrasol</i> 2 y no se tienen beneficios adicionales en cuestiones de ahorro de energía. Además, la resistencia adhesiva es un 50% menos que los que no integran PET. Si el vidrio lateral del vehículo tiene curvaturas pronunciadas, no se recomienda su uso debido a la baja eficiencia del proceso de laminación.
13	V/PVB/PET-CuS 2h/PVB/v	Tabla 4.3	0.238	0.152	0.610	0.55	0.63	0.48	0.76	530	Como se mencionó en el Capítulo 4, este tipo de <i>avicrasol</i> presenta una adhesión residual, lo cual podría resultar beneficioso en el sentido de que no se desprenderían fragmentos de vidrio durante un impacto. Se sugieren más estudios sobre este tipo de <i>avicrasol</i> , dado que mediante tratamientos superficiales al PET, se puede mejorar su resistencia adhesiva. Se recomienda su uso en regiones geográficas propensas a huracanes y tormentas tropicales (cualquiera de las ciudades propuestas).
14	V/PVB/PET-CuS 4h/PVB/v	Tabla 4.3	0.189	0.160	0.652	0.52	0.60	0.38	0.63	4.5	Presenta mejores características ópticas que el anterior, sin embargo la resistencia adhesiva disminuye. Su mayor costo pone a discusión su aplicación como vidrio de control solar únicamente.

Como se muestra en la Tabla D.1, los valores de la radiación solar que incide en una superficie vertical ubicada en cualquiera de las cinco ciudades propuestas, no es mayor a  $850 \text{ W/m}^2$ , y como la evaluación térmica se realizó suponiendo este valor (AM1.5), se tiene que los *avilcrasol* mostrados en la Tabla 5.5 cumplen bien como controladores de la radiación solar o filtros solares.

Se mencionó en el Capítulo 2, que el espesor de las PDS depositadas químicamente sobre las hojas de vidrio o PET, tiene una influencia directa en las características ópticas; es decir, al aumentar el espesor de la PDS, se mejoran las características ópticas de control solar. También se mencionó en el Capítulo 3 que al aumentar el espesor de la PDS, la resistencia adhesiva disminuye. De aquí que se puedan desarrollar *avilcrasol* con PDS que tengan parámetros de control solar mayores ( $T_{\text{SOL}}$  mayor a 0.4) a los presentados en la Tabla 5.5, pero con mejores características mecánicas, los cuales se pueden aplicar en paredes orientadas al norte. Con esto se ganaría una buena iluminación al interior que no se tendría con los *avilcrasol* presentados en la Tabla 5.5, con las características mecánicas de un vidrio laminado de seguridad.

## 5.5 Conclusiones

Se presentaron en este Capítulo los criterios de selección de los *avilcrasol* para su aplicación en regiones geográficas de clima cálido y expuestas a fenómenos climatológicos como tormentas tropicales y huracanes, con base en sus características ópticas, térmicas y mecánicas. Se tiene que la mayor parte de los *avilcrasol* presentados en este Capítulo, cumplen bien su función como vidrios de seguridad, dadas sus propiedades mecánicas, así como también poseen características térmicas y de control solar adecuadas para el ahorro de energía en edificaciones o automóviles ubicados en climas cálidos. Los valores de LSG que presentan los *avilcrasol* son razonables, si se toma en cuenta que un vidrio comercial reflectasol<sup>®</sup>, con un SHGC de 0.19 y una  $T_{\text{VIS}}$  de 0.08, tiene un LSG de 0.41. Cabe mencionar que es necesario realizar más estudios sobre el comportamiento térmico de los *avilcrasol* para poder asegurar su buen funcionamiento en cualquier región geográfica. Este es porque solo

se utilizó un gradiente de temperatura en el modelo teórico, lo cual no ocurre durante el funcionamiento cotidiano de los vidrios.

### Bibliografía

- 1 ISO 9050:2003 **Standard Test Method: Glass in building** — *Determination of light transmittance, solar direct transmittance, total solar energy transmittance, ultraviolet transmittance and related glazing factors.*
- 2 Xamán J P V, **Estudio de la Transferencia de Calor con Flujo Turbulento en una Cavity Cuadrada con Pared Semitransparente**, Tesis doctorado, *Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Cenidet*, mayo 2004.
- 3 Álvarez G G y Fuentes F V, **Notas del curso especializado Arquitectura Bioclimática**, *ISES Millenium Solar Forum 2000*, México, Cd. México, 2000.
- 4 U.S. Department of Energy report DOE/EE-0173 (August 1998): *Spectrally selective glazings*, contacts: <http://www.eren.doe.gov/femp> and [theodor.collins@hq.doe.gov](mailto:theodor.collins@hq.doe.gov) or [eslee@lbl.gov](mailto:eslee@lbl.gov).
- 5 Estrada G C, Alvarez G G and Nair P K, **Thermal performance of an architectural window with chemically deposited SnS-Cu<sub>x</sub>S solar control coating**, *Renewable Energy*, 3 (1993)683.
- 6 Estrada G C A, Alvarez G G and Nair P K, **Theoretical analysis of the thermal performance of chemically deposited solar control coatings**, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **26** (1993)1304.
- 7 Alvarez G G, Jimenez D N, Estrada G C A and Nair P K, **Comparación teórico-experimental de la transferencia de calor en estado transitorio de un vidrio con controlador óptico**, XV111 Reunión Nacional de Energía Solar, Memorias (1994)267.
- 8 Alvarez G G y Estrada G C A, **Estudio teórico de la transferencia de calor en una cavity cuadrada con ventana con controlador óptico**, XV111 Reunión Nacional de Energía Solar, memorias, (1994)276.
- 9 Flores J, Alvarez G G, and Nair P K, **Determinación de coeficientes de sombreado de vidrios laminados con dos filtros solares**, XX11 Semana Nacional de Energía Solar, memorias (1998)280.
- 10 Alvarez G G, Flores J J and Estrada C A, **The termal response of laminated**

- glass with solar control coating, *J. Phys. D: Appl. Phys.* 31(1998)3057.**
- 11 Alvarez G G, Palacios M J and Flores J J, **A test method to evaluate the thermal performance of window glazings, *Appl. Thermal Engineering* 20(2000)803.**
- 12 Alvarez G G, Flores J J and Nair P K, **Influence of thermal emittance on the performance of laminated solar control glazing, *Appl. Thermal Engineering* 21(2001)1813.**
- 13 Duffie J A, **Solar Engineering of Thermal Processes**, John Wiley & Sons Inc, 1991.
- 14 Nair M T S and Nair P K, **Near-ideal solar control characteristics of  $Cu_xS$  thin films, *Semicond. Sci. Technol.* 4 (1989)599.**
- 15 <http://www.uqroo.mx/uqroo/protcivil/protcivil2.htm>.
- 16 Beason W L, Meyers G E and James R W, **Hurricane Related Window Glass Damage in Houston, *J. Structural Engineering*, 110, No. 12 (1984)2843.**
- 17 <http://www.yucatan.com.mx/huracan/escala.htm>.
- 18 TL 957, **Vidrios de Silicato para Vehículos, Requerimientos de Calidad, Norma Interna Volkswagen AG, 2002.**

## CAPÍTULO 6

### CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

En este capítulo se presentan las conclusiones más significativas del trabajo desarrollado durante la realización de este proyecto de tesis sobre los *arreglos de vidrios laminados controladores de la radiación solar (avilcrasol)*. Las principales contribuciones del trabajo al campo del ahorro de energía presentadas en esta tesis son:

- (i) Desarrollo de las metodologías para el depósito químico de películas delgadas en *áreas grandes* ( $0.5 - 1 \text{ m}^2$ ) de ZnS, CuS, y  $\text{Cu}_{2-x}\text{Se}$ , sobre sustratos de vidrio y de plásticos para la producción de los *avilcrasol*;
- (ii) Evaluación de las características ópticas de los *avilcrasol* según *las norma vigente*, ISO 9050-2003;
- (iii) Establecimiento de la metodología de laminación de los *avilcrasol*, que subraya la necesidad de *distinguir entre las caras del vidrio flotado* (aire o estaño) que estarán en contacto con el PVB para el mejoramiento de la adhesión;

- (iv) Determinar que las PDS no afectan significativamente la resistencia adhesiva de los *avilcrasol*, obteniéndose con ello un vidrio laminado que cumple como vidrio de seguridad y de control solar simultáneamente.
- (v) Desarrollo de la metodología para la evaluación de *la resistencia adhesiva* de los *avilcrasol*;
- (vi) Evaluación de los parámetros de *coeficiente de sombreado (SC)*, *coeficiente de ganancia de calor solar (SHGC)*, y *la razón de transmitancia de luz visible y el SHGC, LSG*, de los diferentes *avilcrasol*, utilizando un modelo teórico previamente desarrollado [7-15]; y
- (vii) Establecimiento de *los criterios de selección* para evaluar la potencial aplicación de los *avilcrasol* en distintas regiones geográficas, tanto en arquitectura como en la industria automotriz.

Los detalles sobre las contribuciones mencionadas anteriormente, se presentan en los Capítulos anteriores. A continuación se presenta un breve resumen de ellas.

## **6.1 Conclusiones**

### Conceptos Generales

La revisión de trabajos publicados sobre las propiedades mecánicas de los vidrios laminados, y la información que existe sobre la evaluación de los parámetros ópticos y térmicos de los vidrios con recubrimientos para el control de la radiación solar, presentada en el **Capítulo 1**, estableció la originalidad e importancia del presente trabajo de tesis. Hasta el momento no se han encontrado reportes o publicaciones en revistas sobre las características óptica, mecánica y térmica de los envidriados tipo *avilcrasol*, cumpliendo así una necesidad real en este tema de investigación y desarrollo.

### Desarrollo de los *avilcrasol*

Como base para estudios posteriores sobre características ópticas, térmicas y mecánicas de *avilcrasol* con diferentes tipos de PDS, se presenta en el **Capítulo 2** la

metodología para la obtención y caracterización de los *avilcrasol*. Esta abarca desde el proceso de limpieza de los vidrios, selección del lado (estaño o vidrio) a depositar las películas semiconductoras, el depósito de las películas delgadas semiconductoras (PDS) por la técnica de depósito por baño químico (CBD) en áreas grandes. Además, el proceso de ensamble, pre-laminación y laminación, la selección de las probetas en los *avilcrasol* para la caracterización mecánica, la caracterización óptica de acuerdo a la norma ISO 9050:2003 [1], y la caracterización térmica y mecánica finalmente.

#### Metodología del proceso de laminación:

Dentro del proceso de laminación de los *avilcrasol*, se comprobó, mediante pruebas experimentales de adhesión, que utilizar el lado estaño en contacto con el PVB para la obtención de un vidrio laminado, proporciona menores valores de resistencia adhesiva y esto se debe a que el lado estaño presenta una menor rugosidad. Aunque no se midió la rugosidad en ambos lados del vidrio, la **Figura 2.5** muestra, en la misma escala, el cambio de rugosidad entre estas dos superficies.

#### Resistencia adhesiva

Una de las aportaciones más importantes de este trabajo de tesis, es la cuantificación de la resistencia adhesiva de los *avilcrasol*. En esta investigación se encontró que las películas delgadas de ZnS depositadas sobre vidrio, las cuales se utilizan como sustrato para el crecimiento de las películas de CuS mejoran la resistencia adhesiva de los *avilcrasol*. Se encontró que al depositar una película de ZnS de 60 nm de espesor aproximadamente, aumenta la resistencia adhesiva de un 15% a un 20%, en comparación con un vidrio laminado sencillo bajo las mismas condiciones de fabricación y ensayo, como se muestra en la **Figura 3.5**. Esto complementa investigaciones previas [2-4] reportadas por el CIE-UNAM, sobre el mejoramiento de la adhesión de las películas de ZnS.

Como se ha mencionado en los Capítulos anteriores, la resistencia adhesiva de un vidrio laminado tiene un papel muy importante en la capacidad de absorción de energía durante un impacto. Por esta razón, se considera que la mayor aportación de este

trabajo de tesis fue determinar que las películas delgadas semiconductoras, PDS, depositadas sobre el vidrio no afectan significativamente la adhesión del mismo, como se presentó en la **Figura 3.6**. Así, se lograron a establecer que los vidrios laminados espectralmente selectivos para el control de la radiación solar con las PDS aplicadas por el depósito químico, presentan características mecánicas adecuadas para su aplicación como vidrio de seguridad, además de poseer características ópticas cercanas a las ideales [16,17]. Los *avilcrasol* desarrollados con las PDS aplicadas sobre hojas de vidrio, presentan una amplia gama de valores de adhesión deseable para diversas aplicaciones, desde 7 hasta 14 MPa, según sea el tipo y espesor de película depositada. Respecto a los *avilcrasol* que integran hojas de PET con PDS, se requiere un análisis más profundo, ya que sus valores de resistencia adhesiva, < 5 MPa (**Figura 4.8**), no fueron satisfactorios, según las normas industriales vigentes para aplicaciones automotrices en parabrisas. Se necesita trabajar con diferentes tratamientos superficiales o un polímero de laminación distinto al PVB, que sea más afín al PET.

### Evaluación Térmica

En la evaluación térmica presentada en el **Capítulo 5**, en la cual utiliza un modelo teórico desarrollado anteriormente [7-15], los resultados obtenidos muestran que al utilizar este tipo de vidrios, se pueden reducir la cargas térmicas al interior hasta casi un 50%, para el caso de un *avilcrasol* con una absorción de 0.83, comparado con un vidrio laminado sencillo (claro), con una absorción de 0.18, el cuál reduce la carga térmica sólo en un 12%, **Tabla 5.4**. Para aplicaciones automotrices se presenta la variación de la ganancia térmica y el SHGC respecto al coeficiente convectivo. Para un *avilcrasol* con una absorción de 0.83 y un  $h_o$  de 23 W/m<sup>2</sup>K [1], el  $Q_{in}$  y SHGC son de 458.1 W/m<sup>2</sup> y 0.52 respectivamente, y al aumentar el  $h_o$  a 103 W/m<sup>2</sup>K se tiene que los valores se reducen a 364.25 W/m<sup>2</sup> y 0.46, **Figura 5.6 y 7**.

### Criterios de selección de los *avilcrasol*

Los resultados obtenidos de las caracterizaciones óptica, térmica y mecánica, permiten proponer criterios de selección de los *avilcrasol* para su aplicación en regiones geográficas de clima cálido y propensas a fenómenos climatológicos como tormentas

tropicales y huracanes, con base en el tipo de control solar y resistencia adhesiva que se requieran. Los criterios de selección presentados en **Tabla 5. 5** fueron conceptualizados con base en la experiencia desarrollada durante este trabajo, ya que no existe una guía o norma internacional para aplicaciones arquitectónicas o para envidriados laterales de vehículos de transporte de pasajeros.

#### Perspectivas de aplicación de los *avilcrasol* con PET

La aplicación con mayor perspectiva de los *avilcrasol* con PET está en la industria arquitectónica, ya que en la automotriz el proceso de laminación de vidrios tiene una eficiencia muy baja. Esto es porque, en la actualidad la mayoría de los parabrisas tienen curvaturas muy pronunciadas, y al colocar el PET dentro del laminado, éste sufre deformaciones o pliegues originados por la curvatura misma. Sin embargo, no se descarta su aplicación para los vidrios laterales de los vehículos, como vidrio laminado de seguridad o incluso blindado, incorporando además películas de control solar.

#### Cumplimiento del objetivo principal del trabajo de tesis

En la Tabla 5.6 se presentan las recomendaciones sobre aplicaciones arquitectónicas y automotrices de los *avilcrasol*, donde se pueden destinar un grupo selecto de estos, en este caso los más prometedores. Para llegar a estas recomendaciones se consideraron en conjunto, las características ópticas, térmicas y mecánicas de los *avilcrasol*. Así se concluye que el trabajo presentado en esta tesis, ***Desarrollo de Arreglos de Vidrios Laminados con Recubrimientos Espectralmente Selectivos para Aplicaciones Arquitectónicas y Automotrices***, cumplió con los objetivos propuestos en el apartado 1.4 del Capítulo 1.

## 6.2 Trabajos Futuros

Las perspectivas del presente trabajo están evidentes en las conclusiones presentadas. Es importante lograr un mejor conocimiento sobre el comportamiento óptico, térmico y mecánico de los *avilcrasol*, antes de proponer la producción masiva de estos productos, y se espera que tengan una vida útil de más de veinte años. Aquí se presentan las

recomendaciones que surgen del trabajo desarrollado, como trabajos futuros que darán la pauta a nuevos temas de investigación que cumplan con esta expectativa.

- Con el objetivo de tener patrones de comparación directos con la industria, se debe **correlacionar experimentalmente** la escala de adhesión **Pummel**, que se emplea en la industria automotriz como aseguramiento de calidad, la cual se describe en el apéndice A, con los valores de resistencia adhesiva determinados por el método de corte compresivo utilizado en este trabajo.
- Para reducir la desviación estándar, mencionado en el apartado **2.3.1**, en los valores de resistencia adhesiva, se recomienda cambiar la geometría de la probeta, de cuadrada a circular, reduciendo así el riesgo de fractura en los extremos durante el proceso de corte, ya que esto influye en los valores de resistencia adhesiva. Es necesario implementar un taladro de banco con una broca de diamante de 28.2 mm de diámetro (área = 1 plg<sup>2</sup> aprox., el estándar industrial) para el corte de las probetas de los *avilcrasol*. Así mismo, es necesario construir un *Disprad*, Figura 2.25, adecuado para la geometría circular.
- Se recomienda trabajar con diferentes tipos de PDS, reportadas como recubrimientos para el control de la radiación solar en trabajos anteriores, y caracterizar nuevamente sus propiedades mecánicas, ópticas, según la norma ISO 9050-2003; y térmicas, con el programa de cómputo utilizado en este trabajo. En este se pueden incluir los *avilcrasol* con películas de  **$Bi_2S_3-Cu_xS$** ,  **$SnS-Cu_xS$** ,  **$PbS-CuS$** ,  **$Sb_2S_3-CuS$** , y  **$Cu_xSe$**  reportadas en [16]. Con esto se tendría una mayor variedad de *avilcrasol* para aplicaciones arquitectónicas y automotrices.
- Los altos costos que representan las pruebas destructivas de resistencia adhesiva, hacen reflexionar sobre la búsqueda de un método nuevo para caracterizar mecánicamente los vidrios laminados. Se recomienda hacer estudios para determinar la factibilidad de estimar la resistencia adhesiva de los *avilcrasol* mediante pruebas no destructivas, como ultrasonido o interferometría láser.

- Se recomienda hacer estudios experimentales para determinar como afectan las cargas cíclicas de presión y vacío que simulan los eventos asociados a un huracán y el impacto de pequeños proyectiles contenidos en el viento sobre los *avilcrasol*, en la misma manera en que fueron reportados para vidrios laminados sencillos mencionados en el **apartado 1.2.3**. Poder correlacionar este comportamiento con la resistencia adhesiva del mismo.
- Finalmente, se recomienda hacer estudios de envejecimiento acelerado a los *avilcrasol*, para las aplicaciones sugeridas en la **Tabla 5.6**, con el propósito de estimar la vida útil del mismo. Aunque ya se ha realizado este tipo de estudio anteriormente [17], solamente cubrió un tiempo de tres años a la intemperie, obteniéndose resultados alentadores. Esta información será importante para evaluar la factibilidad económica de los *avilcrasol*.

### 6.3 Publicaciones Derivadas de este Trabajo de Tesis

#### En revistas internacionales con arbitraje

1. J O Aguilar, O Gomez-Daza, A Brito L, M T S Nair, and P K Nair, **Optical and Mechanical Characteristics of Clear and Solar Control Laminated Glass Using Zinc Sulphide and Copper Sulphide Thin Films**, *Surface & Coatings Technology*, (en prensa).
2. G. Alvarez, J.J. Flores, J.O. Aguilar, O. Gómez-Daza, C.A. Estrada, M.T.S. Nair and P.K. Nair, **Spectrally Selective Laminated Glazing Consisting of Solar Control Coating and Heat Mirror Coated Glass: Preparation, Characterization, and Heat Transfer**", *Solar Energy* **78** (2005)113.

#### En revistas nacionales con arbitraje

3. J O Aguilar, O Gomez-Daza, A Brito L, M T S Nair, and P K Nair, **Resistencia adhesiva interfacial de vidrios laminados con películas delgadas semiconductoras**, *Revista Mexicana de Ciencia de Superficies y Vacío*, **17(2)** (2004)15.

---

En Congresos Nacionales e Internacionales

4. P K Nair, J O Aguilar, O Gomez-Daza, and M T S Nair, **Chemically deposited CuS and Cu<sub>2-x</sub>Se coatings in the production of spectrally selective laminated solar control coatings**, 203<sup>rd</sup> Meeting of The Electrochemical Society, Paris, France. ISSN 1091-8213, ISBN 1-56677-382-2, vol. 2003-01, pp 564.
5. J. O. Aguilar, E. M. Pliego, D. García, O. Gómez-Daza, M.T.S. Nair y P. K. Nair, **Películas Delgadas de CuS y CuS-CuSe sobre PET para Fabricación de Vidrios Laminados Controladores de la Radiación Solar**, XXV Semana Nacional de Energía Solar, ANES, 1-5 Oct. 2001, San Luis Potosí, S.L.P.

**Bibliografía**

1. ISO 9050:2003 **Standard Test Method: Glass in building — Determination of light transmittance, solar direct transmittance, total solar energy transmittance, ultraviolet transmittance and related glazing factors.**
2. Nair P K and Nair M T S, **Chemically deposited ZnS thin films: application as substrate for chemically deposited Bi<sub>2</sub>S<sub>3</sub>, Cu<sub>x</sub>S and PbS thin films**, *Semicond Sci Technol* 7 (1992) 239.
3. Huang L, Nair P K, Nair M T S, Zingaro R A and Meyers E, **Interfacial diffusion of metal atoms during air annealing of chemically deposited ZnS-CuS and PbS-CuS thin films**, *J. Electrochem. Soc.* 141(1994)2536.
4. Arenas O L, Nair M T S and Nair P K, **Chemical bath deposition of ZnS thin films and modifications by air annealing**, *Semicond. Sci. Technol.* 12 (1997)1323.
5. Nair M T S and Nair P K, **Near-ideal solar control characteristics of Cu<sub>x</sub>S thin films**, *Semicond. Sci. Technol.* 4 (1989)599.
6. Nair P K, Nair M T S, Gómez-Daza O, García V M, Castillo A, Arenas O L, Peña Y, and Guerrero L, **Laminated solar control safety glass incorporating chemically deposited metal chalcogenide thin films**, *The international Society for optical Engineering, Bellingham, Proc. SPIE* (1997)186.

---

En Congresos Nacionales e Internacionales

4. P K Nair, J O Aguilar, O Gomez-Daza, and M T S Nair, **Chemically deposited CuS and Cu<sub>2-x</sub>Se coatings in the production of spectrally selective laminated solar control coatings**, *203<sup>rd</sup> Meeting of The Electrochemical Society, Paris, France*. ISSN 1091-8213, ISBN 1-56677-382-2, vol. 2003-01, pp 564.
5. J. O. Aguilar, E. M. Pliego, D. García, O. Gómez-Daza, M.T.S. Nair y P. K. Nair, **Películas Delgadas de CuS y CuS-CuSe sobre PET para Fabricación de Vidrios Laminados Controladores de la Radiación Solar**, XXV Semana Nacional de Energía Solar, ANES, 1-5 Oct. 2001, San Luis Potosí, S.L.P.

**Bibliografía**

1. ISO 9050:2003 **Standard Test Method: Glass in building — Determination of light transmittance, solar direct transmittance, total solar energy transmittance, ultraviolet transmittance and related glazing factors**.
2. Nair P K and Nair M T S, **Chemically deposited ZnS thin films: application as substrate for chemically deposited Bi<sub>2</sub>S<sub>3</sub>, Cu<sub>x</sub>S and PbS thin films**, *Semicond Sci Technol* 7 (1992) 239.
3. Huang L, Nair P K, Nair M T S, Zingaro R A and Meyers E, **Interfacial diffusion of metal atoms during air annealing of chemically deposited ZnS-CuS and PbS-CuS thin films**, *J. Electrochem. Soc.* 141(1994)2536.
4. Arenas O L, Nair M T S and Nair P K, **Chemical bath deposition of ZnS thin films and modifications by air annealing**, *Semicond. Sci. Technol.* 12 (1997)1323.
5. Nair M T S and Nair P K, **Near-ideal solar control characteristics of Cu<sub>x</sub>S thin films**, *Semicond. Sci. Technol.* 4 (1989)599.
6. Nair P K, Nair M T S, Gómez-Daza O, García V M, Castillo A, Arenas O L, Peña Y, and Guerrero L, **Laminated solar control safety glass incorporating chemically deposited metal chalcogenide thin films**, *The international Society for optical Engineering, Bellingham, Proc. SPIE* (1997)186.

7. Xamán J P V, **Estudio de la transferencia de calor con flujo turbulento en una cavidad cuadrada con pared semitransparente**, Tesis doctorado, *Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Cenidet*, mayo 2004.
8. Estrada G C, Alvarez G G and Nair P K, **Thermal performance of an architectural window with chemically deposited SnS-Cu<sub>x</sub>S solar control coating**, *Renewable Energy*, 3 (1993)683.
9. Estrada G C A, Alvarez G G and Nair P K, **Theoretical analysis of the thermal performance of chemically deposited solar control coatings**, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **26** (1993)1304.
10. Álvarez G G, Jiménez D N, Estrada G C A and Nair P K, **Comparación teórico-experimental de la transferencia de calor en estado transitorio de un vidrio con controlador óptico**, XV111 Reunión Nacional de Energía Solar, Memorias (1994)267.
11. Álvarez G G y Estrada G C A, **Estudio teórico de la transferencia de calor en una cavidad cuadrada con ventana con controlador óptico**, XV111 Reunión Nacional de Energía Solar, memorias, (1994)276.
12. Flores J, Álvarez G G, and Nair P K, **Determinación de coeficientes de sombreado de vidrios laminados con dos filtros solares**, XX11 Semana Nacional de Energía Solar, memorias (1998)280.
13. Alvarez G G, Flores J J and Estrada C A, **The thermal response of laminated glass with solar control coating**, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **31**(1998)3057.
14. Alvarez G G, Palacios M J and Flores J J, **A test method to evaluate the thermal performance of window glazings**, *Appl. Thermal Engineering* **20**(2000)803.
15. Alvarez G G, Flores J J and Nair P K, **Influence of thermal emittance on the performance of laminated solar control glazing**, *Appl. Thermal Engineering* **21**(2001)1813.
16. Nair P K, Nair M T S, García V M, Arenas O L, Peña Y, Castillo A, Ayala I T, Gomez-Daza O, Sánchez A, Campos J, Hu H, Suárez R, y Rincón M E, **Semiconductor thin films by chemical bath deposition for solar energy applications**, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, **52**(1998)313.

17. Cuevas O, Tamariz J, Gomez-Daza O, Campos J, M T S Nair y P K Nair, **Control de la Radiación Solar Mediante Películas Delgadas de CuS, Depositadas Químicamente**, *Memorias de la XXII Semana Nacional de Energía Solar*, ANES (México), (1998) 268.

## **APÉNDICE A**

### **Aspectos Generales sobre Arreglos de Vidrios Laminados Controladores de la Radiación Solar, *Avilcrasol*.**

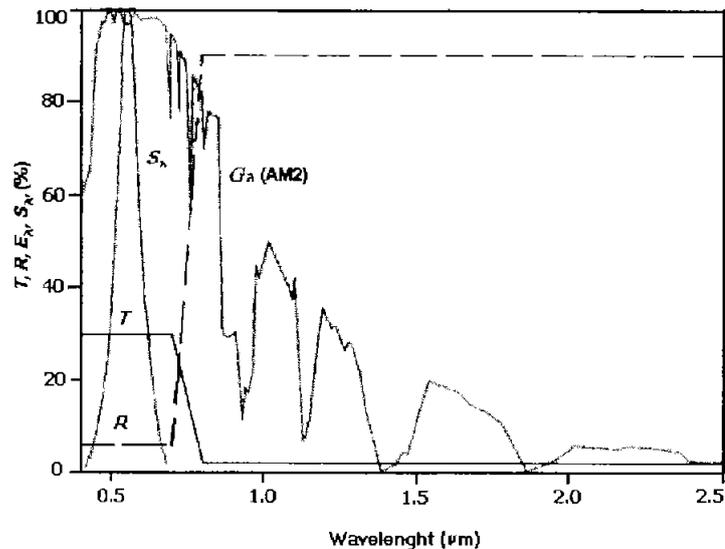
#### **A.1 Características ópticas de los vidrios laminados.**

En climas cálidos, se requiere reducir el calor en el interior de las edificaciones para mejorar el confort; sin embargo, para esto se necesitan grandes cantidades de energía eléctrica para conseguirlo. Una de las alternativas para el ahorro de energía es el uso de vidrios que impidan el paso de la radiación solar en la región del cercano infrarrojo, para evitar el calentamiento dentro de la edificación, y además que permitan una buena iluminación. A este tipo de vidrios se les conoce como vidrios controladores de la radiación solar o simplemente como vidrios (o envidriados) controladores solares.

Los requerimientos de transmitancia óptica  $T$  (%) y reflectancia óptica  $R$  (%) de los controladores de la radiación solar, se sugieren por la distribución de la irradiancia espectral  $G_\lambda$  de la radiación solar y la sensibilidad espectral  $S_\lambda$  del ojo humano para la visión diurna, como se muestra en la Figura A.1. Aquí, los valores normalizados de  $G_\lambda$  se grafican para un espectro solar de dos masas de aire (AM2), para representar un caso típico aplicable a regiones con clima cálido. Ya que la visión diurna del ojo humano responde solo a longitudes de onda que van de 380 a 780 nm, se requiere que la transmitancia de la radiación solar incidente, sea sólo en este estrecho intervalo. La cantidad de luz transmitida se debe ajustar adecuadamente para producir los niveles de iluminación requeridos en el interior de las edificaciones, ya que la radiación excesiva puede causar un incremento en la temperatura interior a través de la conversión foto-térmica en las superficies absorbedoras del interior.

La transmitancia en longitudes de onda más allá de la región del visible debe ser muy baja, logrando esto idealmente con una alta reflectancia (~90%). La alta reflectancia en la región del visible (> 50%) causaría molestos deslumbramientos a las edificaciones vecinas, por lo que no es recomendable la aplicación de vidrios con éstas

características en edificaciones por cuestiones legales y estéticas. En la sección que precede se discuten los aspectos básicos de la interacción de la radiación electromagnética con los recubrimientos semiconductores parcialmente conductivos utilizados en éste proyecto de investigación.



**Figura A.1** Transmitancia  $T$  y reflectancia  $R$  características de un recubrimiento controlador de la radiación solar ideal, mostradas a lo largo del espectro normalizado de la distribución de irradiancia espectral  $G_\lambda$  con un espectro solar AM2 y la dependencia espectral normalizada de sensibilidad  $S_\lambda$  del ojo humano en luz de día.

### A.1.2 Parámetros Ópticos a Evaluar de los Vidrios Laminados

#### Concepto de masas de aire para evaluaciones ópticas de los *avilcrasol*

La habilidad para transmitir la radiación solar de los materiales utilizados en envidriados depende de la distribución de la radiación solar en una longitud de onda específica, en la composición química y espesor del material y en el ángulo de incidencia de la radiación. La transmitancia de vidrios claros de cal-sosa con una incidencia normal ( $0^\circ$ ) a la superficie va de 86% para un espesor de 2.3 mm, 84% para un vidrio de 3 mm y 78% para un vidrio de 6 mm [1]. La variación en la transmitancia de estos vidrios esta en función de la cantidad de hierro que contengan.

Casi todos los vidrios utilizados en arquitectura son opacos a la radiación de onda larga emitida por cualquier superficie a temperaturas cercanas a los 120°C. Ésta característica produce el *efecto invernadero*, en el cuál la radiación solar que atraviesa una ventana es parcialmente atrapada. La radiación solar se absorbe por las superficies al interior de la habitación y la emiten como radiación de onda larga, y no puede escapar a través de las ventanas, ya que éstas son opacas en longitudes de onda mayores a 4500 nm. En algún instante, la radiación solar total  $G$  que incide sobre una ventana, es igual a la suma de la radiación transmitida ( $G\tau$ ), reflejada al exterior ( $G\rho$ ) y absorbida ( $G\alpha$ ):

$$\tau + \rho + \alpha = 1 \tag{A.1}$$

donde  $\tau$  es la transmitancia del material,  $\rho$ , la reflectancia y  $\alpha$  la absorptancia. Los valores de estas tres propiedades ópticas dependen de: (1) el espesor y propiedades físicas del material para envidriado; (2) si tiene alguna película o recubrimiento depositado superficialmente y (3) el ángulo de incidencia de la radiación solar. En la Figura A.2 se presenta la variación de las propiedades ópticas ( $\tau$ ,  $\rho$  y  $\alpha$ ) con el ángulo de incidencia de tres vidrios claros [1]. Como el ángulo de incidencia aumenta desde cero (medido a partir del cenit), la transmitancia disminuye, la reflectancia aumenta, y la absorptancia primero aumenta debido a una trayectoria óptica prolongada y después disminuye porque la mayor parte de la radiación incidente se refleja al exterior.

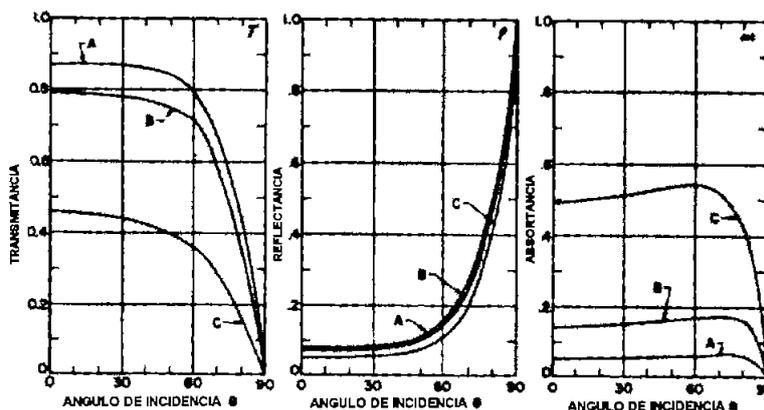


Figura A.2 Variación de la  $\tau$ ,  $\rho$  y  $\alpha$  con el ángulo de incidencia de vidrios A) templado, B) claro y C) absorbente [1]

Para radiación difusa, las propiedades ópticas son similares a las de radiación directa con un ángulo de incidencia de  $60^\circ$ . La máxima ganancia solar a través de los envidriados verticales ocurre usualmente cuando la altitud solar es de  $30^\circ$  a  $35^\circ$  y el acimut de la superficie solar es cercano a cero. En la Figura A.2 se observa que cuando el ángulo de incidencia esta entre los  $0^\circ$  y  $30^\circ$  los valores de  $\tau$  y  $\rho$  se mantienen casi constantes en los tres casos. Cuando el ángulo de incidencia toma valores mayores a  $60^\circ$ , la  $\tau$  se reduce abruptamente y  $\rho$  aumenta de la misma manera.

La radiación proveniente del sol llega hasta el exterior de la atmósfera de la Tierra con una intensidad constante de  $G = 1367 \text{ W/m}^2$ , llamada la constante solar de la radiación extraterrestre. La radiación solar que llega a la superficie de la tierra no suele superar los  $1000 \text{ W/m}^2$ , debido a la absorción y reflexión de la atmósfera, y a la inclinación de los rayos solares. A la radiación solar extraterrestre se le denomina AM0. Se considera una masa de aire 1 (AM1) a la radiación solar dentro de la atmósfera terrestre cuando la incidencia de los rayos solares es normal ( $0^\circ$  respecto al zenit) a la superficie terrestre. Utilizando la ecuación  $n = 1/\cos\phi$ , donde  $\phi$  es el ángulo zenital (o de incidencia), se puede determinar la masa de aire. Así, para un ángulo de incidencia de  $60^\circ$ , se tiene que  $n = 2$ . La irradiancia solar para las masas de aire 1, 1.5 y 2 es de  $875$ ,  $834 \text{ W/m}^2$  y  $736 \text{ W/m}^2$  respectivamente. Para la evaluación óptica los *avilcrasol* desarrollados en este trabajo de investigación se utilizó la norma ISO 9050:2003, la cual combina una irradiancia espectral AM1.5 con la sensibilidad del ojo humano a la luz del día, el procedimiento para el cálculo de los parámetros ópticos se muestra en la sección precedente.

### **Parámetros Ópticos de Acuerdo a la Norma ISO 9050-2003**

Para la evaluación óptica de los *avilcrasol* se utilizó la norma ISO 9050:2003 [2], que actualmente se utiliza como estándar para la evaluación de vidrios con filtro solar [3] y en ella se considera la sensibilidad del ojo humano a la luz del día, y esto no se consideraba en las evaluaciones ópticas realizadas hace unos pocos años [4-13].

Éste método utiliza una incidencia de radiación casi normal y paralela, para las mediciones; las muestras se deben irradiar por un haz cuyo eje no debe exceder los 10° respecto a la normal de la superficie. El ángulo entre el eje y el rayo del haz iluminante no deben exceder los 5°. Los parámetros característicos que se evalúan con esta norma son los siguientes: transmitancia espectral  $\tau(\lambda)$  y reflectancia espectral  $\rho(\lambda)$  en un intervalo de longitud de onda de 300 nm a 2500 nm; transmitancia de luz  $\tau_v$ , reflectancia de luz  $\rho_v$  para el iluminante D65; transmitancia solar directa  $\tau$  y reflectancia solar directa  $\rho$ ; transmitancia de energía solar total (factor solar)  $g$  y la transmitancia UV  $\tau_{uv}$ . Las ecuaciones utilizadas para evaluar los vidrios laminados que se utilizaron en esta investigación, se describen detalladamente en la norma ISO 9050:2003 [2].

### A.1.3 Interacción Electromagnética en Películas Delgadas Semiconductoras

Para correlacionar el comportamiento óptico de las películas delgadas semiconductoras utilizadas en este trabajo de investigación, se desarrollo un modelo teórico a partir de las ecuaciones de Maxwell para ondas electromagnéticas y se comparó experimentalmente con los parámetros ópticos medidos a películas delgadas semiconductoras depositadas sobre vidrio claro de cal-sosa, ver Capítulo 2. A continuación se presenta una breve descripción sobre la teoría de ondas electromagnéticas en un medio parcialmente conductor y en un medio semiconductor en las que se basa dicho modelo.

Las ecuaciones de ondas electromagnéticas están dadas por la variación de la intensidad del campo eléctrico ( $E$ ) y magnético ( $B$ ) en tiempo y el espacio [14]:

$$E_x = E_0 \text{ sen} \frac{2\pi}{\lambda} (vt - z) \quad (\text{A.2})$$

$$B_y = B_0 \text{ sen} \frac{2\pi}{\lambda} (vt - z) \quad (\text{A.3})$$

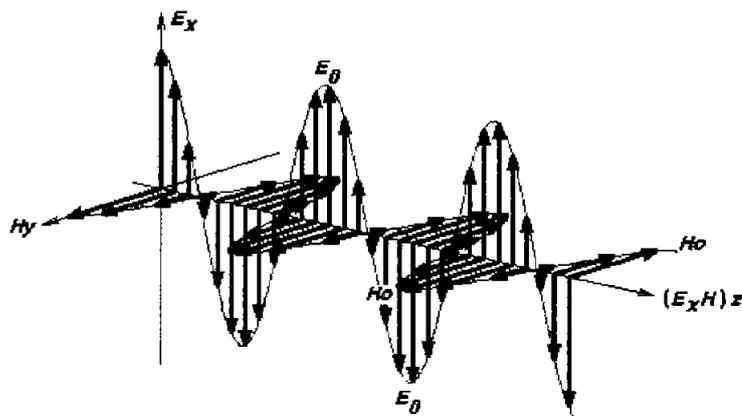


Figura A.3 Propagación de una onda electromagnética.

Donde la energía de las ondas electromagnéticas se propaga en la dirección z; el producto  $E \times B$  proporciona la cantidad de energía que fluye por segundo a través de un metro de área ( $\text{Wm}^{-2}$ ). La relación entre  $E$  y  $B$  se da por las ecuaciones [14]:

$$-\mu \frac{\partial B_y}{\partial t} = \frac{\partial E_x}{\partial z}; \quad \epsilon \frac{\partial E_x}{\partial t} = -\frac{\partial B_y}{\partial z} \quad (\text{A.4})$$

donde  $\mu$  es la permeabilidad y es igual a  $\mu = \frac{\mu_0}{\mu_r}$ , siendo  $\mu_0$  la permeabilidad en el vacío ( $4\pi \times 10^{-7} \text{ Hm}^{-1}$ ) y  $\mu_r$  es la permeabilidad relativa;  $\epsilon$  es la permitividad y es igual a  $\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$ , donde  $\epsilon_0$  es la permitividad en el vacío ( $8.85 \times 10^{-12} \text{ Fm}^{-1}$ ) y  $\epsilon_r$  es la permitividad relativa o constante dieléctrica.

La velocidad de propagación de las ondas electromagnéticas presentada en las ecuaciones (A.2) y (A.3) esta dada por:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon}} \quad (\text{A.5})$$

y para el vacío su valor es de  $2.99 \times 10^8 \text{ ms}^{-1}$

Las películas delgadas semiconductoras de sulfuros y seleniuros de cobre, utilizadas en los vidrios laminados, tienen una conductividad eléctrica ( $\sigma$ )  $> 10^5$  ( $\Omega\text{m}$ )<sup>-1</sup>, y se comportan como un dieléctrico o un conductor dependiendo de la magnitud relativa de los parámetros ( $\omega\mu\sigma$ ) y ( $\omega^2\mu\epsilon$ ) en la ecuación:

$$\frac{\partial^2}{\partial z^2} E_x - (i\omega\mu\sigma - \omega^2\mu\epsilon)E_x = 0 \quad (\text{A.6})$$

Si el medio es conductor se involucra disipación de energía cuando  $\sigma \gg \omega\epsilon$  y es dieléctrico cuando  $\sigma \ll \omega\epsilon$ . Para un medio de conductividad eléctrica  $5 \times 10^5$  ( $\Omega\text{m}$ )<sup>-1</sup> y una constante dieléctrica de 10, la longitud de onda ( $\lambda_c$ ) para la cual  $\sigma = \omega\epsilon$ , donde  $\omega$  es la frecuencia de la onda, es:

$$\lambda_c = \frac{2\pi c\epsilon}{\sigma} = \frac{2\pi(3 \times 10^8)(8.85 \times 10^{-12})(10)}{5 \times 10^5} = 0.33 \times 10^{-6} \text{ m (330 nm)}$$

Asimismo,  $\lambda_c = 825$  nm para  $\sigma = 2 \times 10^5 \Omega^{-1}\text{m}^{-1}$  ( $2000 \Omega^{-1}\text{cm}^{-1}$ ), valor típico para los recubrimientos de CuS y Cu<sub>2-x</sub>Se. En el caso de conductores donde  $\sigma \gg \omega\epsilon$ , y cuando  $\lambda \gg \lambda_c$ . La propagación es atenuada:

$$E_x = E_x e^{-\left(\frac{\omega\mu\sigma}{2}\right)^{1/2} z} e^{i\left[\omega t - \left(\frac{\omega\mu\sigma}{2}\right)^{1/2} z\right]} \quad (\text{A.7})$$

Debido a la interacción del campo eléctrico con los portadores de carga, la intensidad de luz ( $I_x \propto E_x^2$ ) disminuye con el espesor (x) del medio, de acuerdo a las siguientes ecuaciones:

$$I_x = I_0 e^{-2\left(\frac{\omega\mu\sigma}{2}\right)^{1/2} z} = I_0 e^{-2\alpha_c z} \quad (\text{A.8})$$

Donde el coeficiente de absorción óptica ( $\alpha_c$ ) debido a la conductividad eléctrica está dado por

$$\alpha_c = 2 \left( \frac{\omega \mu \sigma}{2} \right)^{1/2} = \left( \frac{4\pi\sigma}{c\epsilon_0\lambda} \right) \quad (\text{A.9})$$

Así mismo, los portadores de carga libre causan la reflexión [14].

$$R(\%) = 100 \left[ 1 - 4 \left( \frac{\pi c \epsilon_0}{\lambda \sigma} \right)^{1/2} \right] \quad (\text{A.10})$$

Para  $\sigma = 2000 \Omega^{-1}\text{cm}^{-1}$ , la  $R(\%)$  a  $\lambda = 2500 \text{ nm}$  es  $\sim 40\%$ . La absorción óptica debido a la absorción óptica entre bandas de energía en los semiconductores, con brecha de energía  $E_g$ , se inicia a longitudes de onda  $\lambda < \lambda_g$ ; donde  $\lambda_g(\mu\text{m}) = \frac{1.24}{E_g(\text{eV})}$ , debido a la generación de portadores de carga. Para los semiconductores con *brecha de energía directa* la variación del coeficiente de absorción óptica ( $\alpha_g$ ) es  $\alpha_g \cong cte \left( \frac{h\nu}{\lambda} - E_g \right)^{1/2}$  y para *brecha de energía indirecta*  $\alpha_g \cong cte \left( \frac{h\nu}{\lambda} - E_g \right)^2$  [15]. Esto ocasiona que la transmitancia óptica disminuya al reducirse los valores de longitud de onda para  $\lambda < \lambda_c$  de acuerdo a la ecuación:

$$I_x = I_{x0} e^{-\alpha_g x} \quad (\text{A.11})$$

## A.2 Definición de vidrio laminado

Un vidrio laminado está compuesto por dos hojas de vidrio y comúnmente una hoja intermedia de poli vinyl butyral (PVB), unidas mediante calor y presión. También se utilizan hojas de etilén vinyl acetato (EVA) y poliuretano (PU) como polímeros de laminación en casos específicos. Una vez unido, el vidrio emparedado se comporta como un sólo elemento, y a simple vista parece un vidrio normal. Se pueden utilizar

vidrios templados, semi templado o termo endurecidos para fabricar vidrios laminados. Similar al vidrio de los parabrisas de los automóviles, un vidrio laminado se puede romper durante un impacto, pero los fragmentos del vidrio permanecerán adheridos a la hoja intermedia de PVB, evitando potenciales daños causados por el desprendimiento de fragmentos de vidrio.

El vidrio laminado, es el único vidrio que proporciona durabilidad, alto rendimiento y beneficios multifuncionales, preservando al mismo tiempo la apariencia estética del vidrio. Además, proporciona soluciones a muchos problemas de diseño arquitectónico y ofrece una mayor protección contra los efectos de desastres tales como huracanes, terremotos y explosiones de bombas. Entre los beneficios que proporcionan los vidrios laminados se pueden enumerar los siguientes.

### **Seguridad**

Un envidriado de seguridad es aquel que se construye para soportar las cargas resultantes de amenazas naturales o intencionales, mientras permite el paso de la luz a través de éste, esta es una razón que los hace una excelente opción en envidriados arquitectónicos. En aplicaciones verticales o inclinadas, el vidrio laminado puede resistir la penetración al impacto. Si el vidrio se fractura, los fragmentos permanecerán adheridos a la hoja de PVB, reduciendo el riesgo de lesiones personales y daños al inmueble. Las características que debe tener un envidriado que es denominado de seguridad son las siguientes [16]:

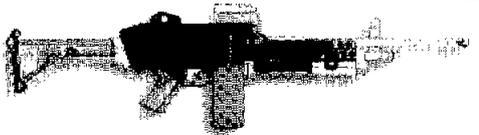
- Debe poseer una calidad óptica excelente y una facilidad de mantenimiento.
- Resistencia a amenazas específicas como huracanes, terremotos, impactos, fracturas, entrada con violencia, ondas expansivas de bombas, explosiones accidentales y ataques balísticos. Cabe mencionar que en función de las características del envidriado, es decir, espesor y número de vidrios y polímeros de laminación, se tendrán diferentes niveles de seguridad.
- Se requiere que el envidriado falle con seguridad en distintos tipos de amenazas. Los materiales del envidriado se pueden romper o fracturar, pero no deben poner en riesgo la vida de las personas o los bienes y no deben desprenderse fragmentos de

vidrios que puedan dañar a las personas o al inmueble. Cuando se rompe un vidrio de seguridad, debe mantener la integridad del edificio y así evitar daños mayores al interior del mismo.

### Blindaje

Ofrece más protección a personas y propiedades que otros productos de vidrio. La configuración estándar de dos hojas de vidrio y una hoja de PVB proporcionan resistencia a la penetración, cuando se intenta entrar por la fuerza. En configuraciones multi capas, el vidrio laminado puede resistir el impacto de balas, objetos pesados, o pequeñas explosiones. En la mayoría de los casos, se requiere de muchos golpes en el mismo sitio para penetrar el vidrio. Dependiendo del nivel de blindaje, son capaces de resistir impactos de armas de diversos calibres sin ser perforados. Las aplicaciones de este tipo de vidrios pueden ser: bancos, joyerías, museos, comercios, casas habitación y la industria naval y militar. La Tabla A.1 muestra los niveles de blindaje existentes en el mercado [17]. Se observan el tipo de arma, el peso de los proyectiles y la velocidad máxima que éstos alcanzan.

Tabla A.1 Niveles de blindaje en vidrios laminados [17].

Nivel de Blindaje	Tipo de Arma	Descripción
III. Antiasalto		Pistolas y revólveres calibre 38 especial, 45, 9mm. Parabellum, .357 y .44 Magnum, Ametralladoras 9mm UZ1 y MP5 e inferiores. Certificación balística UL-752 Nivel 3 (.44 magnum SWC/GC/SP, 240grs., <b>411m/s</b> )
IV. Antisecuestro		Rifles militares .30 US M1, AMD-65 y AK 47 / M43 "cuerno de chivo" e inferiores. Certificación balística CEN B4+ (7.62x39 FMJ/PB/FE, semi-AP, <b>710m/s</b> )
V. Antiterrorismo		Rifles militares calibre 7.62x51 (US M-80) e inferiores. Certificación balística U1-752 Nivel 5 (7.62x51 FMJ/SC (US M-80), <b>838m/s</b> )
VI. Presidencial		Rifles militares calibre 7.62x51 NATO y 5.56x45 NATO e inferiores Certificación balística CEN B6 y UL-752 N 8 (7.62x51 FMJ(Acero)/PB/SC, 830m/s, y 5.56x45 FMJ/PB/SCP, semi-AP, <b>950m/s</b> )

### **Control Acústico**

Por naturaleza, el vidrio ofrece un desempeño pobre cuando se consideran sus características de transmisión acústica. Afortunadamente, el vidrio utilizado en la construcción de edificios ofrece otros beneficios significativos. Es por ello que se buscan maneras de optimizar el desempeño acústico del vidrio para aplicaciones específicas. Como todo material, la atenuación acústica depende de las características de su masa, rigidez y atenuación. Con una sola hoja de vidrio la única manera eficiente de incrementar su desempeño es aumentando su grosor ya que su rigidez y atenuación no pueden ser alteradas. La atenuación acústica para una sola hoja de vidrio, medida a lo largo de 18 frecuencias diferentes, varía dependiendo del espesor del vidrio [18].

El vidrio más grueso tiende a ofrecer una mayor reducción de sonido a pesar de que es capaz de transmitir más sonido a frecuencias específicas. Las frecuencias críticas pueden mostrar mejoras en la atenuación acústica mientras que las frecuencias no críticas de hecho transmiten más sonido. Esto se debe a las tres regiones distintas en que el vidrio reacciona al sonido: controlado por la masa, controlado por la resonancia y controlado por la rigidez. Dentro de las regiones de resonancia y rigidez es posible lograr mayor nivel de transmisión del sonido (NTS) variando el espesor del vidrio en construcciones de hojas de vidrio múltiples. En la región de la masa se requiere aumentar el peso.

Además del comportamiento del vidrio dentro de estas regiones, los varios espesores de vidrio y las varias construcciones (laminado, aislante o una combinación de ambos) tienen su propia frecuencia crítica específica a la cual comienzan a vibrar. Es a esta frecuencia crítica que ocurre la mayor cantidad de transmisión acústica.

Las hojas de vidrio monolítico van a ofrecer los niveles de desempeño acústico más bajos. El vidrio laminado puede ofrecer niveles de desempeño acústicos más altos que los del vidrio monolítico gracias a las características de atenuación acústica de la hoja de PVB utilizada para unir las hojas de vidrio. La atenuación acústica del PVB, hacen del vidrio laminado un producto efectivo para el control del sonido. El vidrio laminado se usa comúnmente en aeropuertos, museos, estudios de grabación, y escuelas, con el

propósito de mantenerse aislados del ruido exterior. La Tabla A.2 muestra los niveles de transmisión acústica de los vidrios monolíticos y laminados. El valor STC es un número indicador derivado de las pérdidas de transmisión de sonido individuales dadas en ciertas frecuencias específicas.

**Tabla A.2** Valores de pérdida de transmisión de sonido de vidrios [18].

Tipo de Cristal	Pérdida de Transmisión de sonido en decibeles												
	Valor STC	Frecuencias (Hz)											
		100	125	200	250	400	500	800	1000	1600	2000	4000	5000
Vidrio (V) 6mm esp.	31	23	25	24	28	29	31	34	34	34	30	37	41
V 12 mm esp.	36	26	30	30	33	34	36	35	32	36	40	50	51
V 3 mm + PVB 0.76 mm +V 3mm	35	24	26	28	29	30	32	35	35	36	35	43	45
V 6mm + PVB 0.76 mm + V 6 mm.	38	25	29	30	33	34	36	37	37	37	41	51	53

### ***Buen Desempeño en Energía Solar***

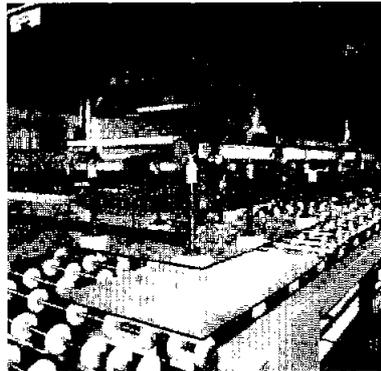
Con el paso del tiempo, la luz solar puede causar un daño considerable a los muebles del edificio, alfombras, obras de arte, plantas y algunos otros objetos. Estos artículos necesitan una protección especial de los dañinos efectos de los rayos solares ultravioletas (UV). La hoja de PVB del vidrio laminado tiene la característica de proteger de la radiación UV, disminuyendo la transmitancia en esta región del espectro solar. Los valores aproximados de transmitancia óptica en las regiones del UV, VIS (visible) y NIR (cercano infrarrojo) son de 0.5%, 80% y 78% respectivamente. Los valores anteriores son para un vidrio laminado formado por dos hojas de vidrio claro de 3 mm de espesor unidas con una hoja polimérica de PVB de 0.76 mm de espesor.

### **A.3 Proceso de Fabricación de Vidrios Laminados**

El proceso de fabricación de vidrios laminados requiere de una estricta limpieza de los vidrios, además de un cuidadoso manejo de la hoja de PVB. El primer paso en la fabricación de los vidrios laminados es cortar dos hojas de vidrio de iguales dimensiones. El corte de los vidrios debe ser limpio, ya que la presencia de micro

facturas en los extremos puede causar el rompimiento de los vidrios durante el proceso de laminación. La limpieza de los vidrios se debe hacer con detergente diluido en agua, posteriormente se enjuagan con agua destilada y se secan con aire caliente. Se debe tener cuidado en mantener la temperatura de los vidrios entre 25° y 30°C, ya que a mayores temperaturas la hoja de PVB se adherirá fuertemente al vidrio y hará difícil su ensamble [19].

El siguiente procedimiento es colocar la hoja de PVB entre los vidrios para formar el emparedado, y al aplicarle calor y presión obtendremos el vidrio laminado. En la Figura A.4 se observa un sistema automatizado para ensamble y fabricación de vidrios laminado utilizado por la empresa Trosifol [19].



**Figura A.4** Sistema automatizado para producción de vidrio laminado [19].

Para lograr mejores resultados de calidad del vidrio laminado, se debe tener mucho cuidado en el manejo de los rollos de PVB, ya que al desenrollar el material, se generan cargas estáticas, las que facilitan la contaminación por atracción de partículas suspendidas en el aire. El PVB se debe mantener a una temperatura de 18° a 20°C y con una humedad relativa de 25 a 30% para no tener problemas con su manejo.

El emparedado no se puede introducir directamente en la autoclave para su laminación, ya que esto provocaría inclusiones de aire. Se requiere de un proceso llamado “pre laminación”, que se debe llevar a cabo antes del proceso de laminación. La calidad de un vidrio laminado depende en gran medida de la calidad del proceso de laminación.

Existen dos tipos de procesos para la pre laminación de vidrio, uno es mediante rodillos y el otro es utilizando una bolsa de vacío.

### ***Proceso de Pre-laminación***

La pre-laminación con rodillos, consiste en pasar el vidrio emparedado por un par de rodillos, los cuales le ejercen una presión aproximada de  $2 \text{ kg/cm}^2$ , y luego se pasan a través de una cámara de calentamiento, que tiene una temperatura de  $60^\circ$  a  $70^\circ\text{C}$ . A la salida de la cámara de calentamiento se encuentra otro par de rodillos, los que reducen al máximo las burbujas de aire contenidas en el vidrio emparedado, al aplicar presión sobre éste. La calidad de la pre-laminación se puede determinar por inspección visual, la apariencia del vidrio debe ser opaca, no debe presentar burbujas y solamente los extremos del vidrio deben estar transparentes.

El sistema de pre-laminación en bolsa de vacío se emplea en la fabricación de vidrios laminados con formas complejas, como pueden ser los parabrisas automotrices. El proceso utiliza bolsas de plástico resistentes a la temperatura, dentro de las cuales se introducen los vidrios emparedados y posteriormente se sella herméticamente. Las bolsas cuentan con una válvula para la conexión de una bomba de vacío, con la que se evacua el aire del interior de la bolsa. La bolsa se introduce a un horno y se eleva la temperatura a  $120^\circ\text{C}$  durante un tiempo de 30 a 60 minutos. Los vidrios pre laminados por el proceso de bolsa de vacío generalmente son más transparentes que los pre-laminados en rodillos. Las condiciones óptimas del proceso de pre-laminación, como son la temperatura y el tiempo de laminación se deben determinar mediante ensayos, ya que estas dependen en gran medida del equipo que se este utilizando.

### ***Proceso de Laminación***

La laminación final del vidrio laminado se lleva a cabo en una autoclave, ver Figura A.5. El sistema esta diseñado para proporcionar una distribución de presiones uniforme en la superficie del vidrio. Los vidrios se colocan generalmente en forma vertical dentro del horno, en estantes especiales para ello. Los vidrios no deben entrar en contacto con partes metálicas, ya sea del estante o de la propia autoclave, porque esto causaría una

variación en la temperatura del vidrio y fractura por choque térmico. Los laminados se deben colocar y fijar firmemente dentro de los estantes, de no ser así podrían romperse a causa de la turbulencia de aire generada en el interior.



Figura A.5 Autoclave para Laminación de Vidrio, CIE-UNAM.

El proceso de laminación en autoclave tiene tres fases. *La primera fase* es el calentamiento, la presión y temperatura en la autoclave se elevan simultáneamente, en una autoclave cargada a su máxima capacidad la temperatura durante el ciclo de calentamiento puede llegar a ser mucho más alta que la temperatura del vidrio. La presión y temperatura en esta fase son  $12.3 \text{ kg/cm}^2$  (175 psi) y  $135^\circ$  a  $145^\circ\text{C}$  ( $275^\circ$  a  $293^\circ\text{F}$ ) respectivamente. La fase de calentamiento finaliza cuando se alcanza la temperatura máxima de operación. *La segunda fase* es el tiempo durante el cual el vidrio esta sujeto a la máxima presión y temperatura. Cuando se fija el tiempo de laminación se debe tomar en cuenta la cantidad de vidrio que se va a laminar. Para laminados delgados, el tiempo de laminación debe ser al menos de 30 minutos, para asegurar una presión adecuada en los niveles máximos de presión y temperatura.

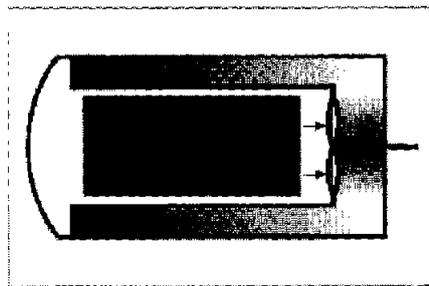


Figura A.6. Calentamiento en un Autoclave [19]

En la Figura A.6 se puede observar que aún en la autoclave mejor ventilada, la temperatura en el área cercana a la parte superior de la puerta será más alta, mientras que en la parte posterior será menor. La *tercera fase* comprende el período de enfriamiento y despresurización. Primeramente se tiene que enfriar la autoclave hasta alcanzar una temperatura de 50 – 60°C y posteriormente despresurizar.

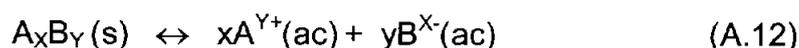
El proceso de laminación en autoclave es de vital importancia para la calidad del vidrio laminado. Si el autoclave no alcanza la presión de 12.3 kgcm<sup>-2</sup> se pueden utilizar presiones menores, pero se debe aumentar la duración de la laminación. El intervalo de temperaturas de 135° a 145°C (275 a 293°F) debe mantenerse en todos los casos.

#### A.4 Depósito por Baño Químico de Películas Controladoras de la Radiación Solar

##### **Principios**

Los fundamentos de esta técnica se basan en el hecho de que en una solución saturada de un compuesto poco soluble, el producto de las concentraciones molares de sus iones – donde cada término de concentración debe estar elevado a una potencia igual al número de iones de esa clase que aparece en la fórmula del compuesto, – llamado producto iónico PI, tiende a una constante en condiciones de equilibrio. Dicha constante se denomina producto de solubilidad, PS y depende del compuesto poco soluble y de la temperatura [20].

Considerando el compuesto A<sub>x</sub>B<sub>y</sub>, el cual se disocia en agua de acuerdo con la reacción

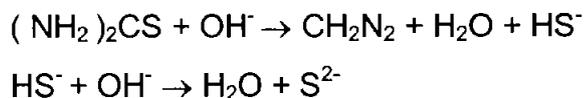


El producto iónico, está dado por la expresión

$$[A]^x [B]^y = PI \quad (A.13)$$

En condiciones de equilibrio químico  $PI = PS$ . Si no se satisface esta expresión, no puede existir equilibrio químico. Si el producto iónico excede al producto de solubilidad, entonces ocurre la precipitación del compuesto  $A_xB_y$ . Si  $PI < PS$ , entonces la fase sólida se disolverá hasta que se alcance el equilibrio, es decir hasta que se satisfaga la ecuación (A.13).

Uno de los problemas que se presentan en la formación de películas delgadas es el fenómeno de la precipitación espontánea. Es posible evitar dicho problema si se utilizan ligantes (complejantes) fuertes para que reaccionen con los cationes, y de esta manera se forme un complejo estable. Otra forma de controlar este problema es mediante la generación lenta de iones calcógenos, a partir de baños químicos en medio acuoso. Por ejemplo, en el caso de la preparación de los sulfuros de metales se emplea la tiourea como fuente de los iones  $S^{2-}$ , en donde la liberación de estos iones es controlada por la reacción [21]:



Cuando el producto de solubilidad del calcógeno de metal correspondiente, se excede, se inicia la reacción de los iones de metales y calcógeno sobre la superficie de los substratos, mediante procesos de condensación ion por ion, mismos que dan lugar a la formación de centros de nucleación, los cuales son necesarios para el crecimiento de las películas. Las diferentes etapas del proceso de crecimiento de las películas delgadas semiconductoras mediante esta técnica de depósito son [22-23]:

1. Período de inducción: Durante este período se establecen los diferentes equilibrios químicos en el baño, formándose una monocapa inicial del calcógeno de metal sobre el substrato; esta etapa también se conoce como nucleación o período de incubación.
2. Fase de crecimiento: En esta etapa, la monocapa del semiconductor que se forma inicialmente sobre el substrato, actúa como una superficie catalítica para la

condensación de los iones calcogenuro y metálicos, dando como resultado el crecimiento las películas.

3. Fase terminal: En el crecimiento de las películas, se supone una velocidad máxima en un cierto tiempo, dependiendo de los parámetros del baño y finalmente se alcanza la fase terminal, en la cual la película deja de crecer.

Así mismo se deben de tomar en cuenta las siguientes consideraciones:

- Disminución en la duración del período de inducción. Esta etapa se logra con el incremento de la temperatura y de la concentración de los iones en el baño.
- Óptima combinación de temperatura - concentración. Para obtener un espesor de película máximo, para un tiempo de duración específico del depósito.

### **A.5 Ganancia Térmica**

De acuerdo a la ecuación A.1, el balance de energía incidente en un envidriado es equivalente al 100%, donde una parte se transmite ( $\tau$ ), otra se refleja, ( $\rho$ ) y el resto se absorbe ( $\alpha$ ) por el envidriado. Además, la parte absorbida se divide en dos partes,  $q_i$  y  $q_o$ , las cuales son las energías transferidas al interior y exterior respectivamente. Para determinar la transferencia de calor al interior de la habitación,  $q_i$  se necesitan los coeficientes de transferencia de calor del envidriado hacia el exterior,  $h_o$ , y hacia el interior,  $h_i$ . Estos valores dependen principalmente en la posición del envidriado, velocidad del viento, temperaturas interior y exterior y, por tanto las temperaturas exterior e interior del vidrio. Por simplicidad, se toman las siguientes convenciones para determinar los coeficientes de transferencia de calor en un vidrio monolítico, de acuerdo a [2].

- Posición del vidrio vertical
- Una velocidad de viento en el exterior de 4 m/s y una emisividad corregida de 0.837
- La superficie interior esta sujeta a convección natural y emisividad opcional
- El espacio de aire en la habitación se encuentra sin ventilación

Bajo esta convención y con condiciones promedio, los valores estándar para  $h_o$  y  $h_i$  [2] se obtienen de:

$$h_o = 23 \frac{W}{m^2 K} \quad \text{y} \quad h_i = \left( 3.6 + \frac{4.4 \varepsilon_i}{0.837} \right) \frac{W}{m^2 K}$$

donde  $E_i$  es la emisividad corregida de la superficie interior (para un vidrio de sosa cal,  $E_i = 0.837$  y  $h_i = 8 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ ). Los valores de  $E_i$  menores de 0.837 [2] (debido a recubrimientos superficiales con alta reflectancia en el lejano infrarrojo) solo se deben tomar en cuenta si la condensación sobre la superficie recubierta se puede excluir. El factor de transferencia de calor secundario para un envidriado simple se determina de la siguiente ecuación [1]:

$$q_i = \alpha \frac{h_i}{h_o + h_i} \quad (\text{A.14})$$

Los cálculos anteriores solo consideran transferencia de calor por convección al interior y exterior de la habitación, además el balance térmico considera un solo elemento, en este caso el vidrio. En el Capítulo 5 se presenta un balance térmico para cada *avilcrasol* en particular y se muestran los valores del coeficiente de sombreado y del coeficiente de ganancia de calor solar obtenidos con dicho balance. La Figura A.7 presenta un esquema del balance térmico de un vidrio monolítico claro al ser iluminado por los rayos solares y el medio externo (radiación directa y difusa respectivamente) en cualquier instante, en donde se considera transferencia de calor por radiación y convección al interior y al exterior.

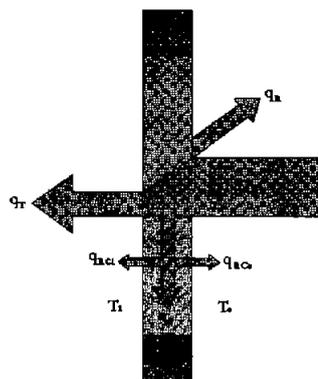


Figura A.7 Balance térmico en un vidrio monolítico claro.

Donde  $q_R$ ,  $q_A$  y  $q_T$  representan el calor reflejado, absorbido y transmitido respectivamente. En general, la magnitud de  $q_A$  es pequeña en el caso de vidrio claro. Los términos  $q_{RCo}$  y  $q_{RCi}$  son la tasa de flujo de calor por radiación y convección hacia el exterior e interior respectivamente y  $T_o$  y  $T_i$ . La tasa de producción de calor al exterior o calor rechazado a la atmósfera es la suma de  $q_R$  y  $q_{RCo}$ . La ecuación que representa el balance térmico del vidrio monolítico es [1]:

$$G + U(T_o - T_i) = q_R + q_A + q_T + q_{RCo} + q_{RCi} \tag{A.15}$$

$G$  representa la irradiancia solar incidente ( $W/m^2$ ) sobre el vidrio y  $U$  es el coeficiente total de transferencia de calor del vidrio ( $W/m^2K$ ). Para determinar el valor de  $U$  se utiliza la siguiente ecuación:

$$U = \frac{1}{\left(\frac{1}{h_o}\right) + \left(\frac{1}{h_i}\right) + \left(\frac{L}{k}\right)} \tag{A.16}$$

donde,  $L$  (m) es el espesor del vidrio y  $k$  ( $W/mK$ ) es la conductividad térmica del mismo. La ecuación anterior se utiliza para vidrios monolíticos, y en caso de analizar vidrios multicapas se debe tomar en cuenta el espesor y la conductividad térmica de cada uno de los componentes. Al resultado de la cantidad total de irradiancia, menos la cantidad

de radiación transmitida y reflejada, para las regiones UV, VIS y NIR, se le conoce como absorptancia, cuya ecuación se deduce de la ecuación A.1.

$$\alpha = 1 - \tau - \rho \quad (\text{A.17})$$

Como se mencionó anteriormente, la absorptancia, expresada en porcentaje, es la fracción de la radiación solar incidente que se absorbe, en este caso por la película controladora de la radiación solar integrada al vidrio laminado. Ésta energía se disipa hacia el interior ( $q_{RCi}$ ) y exterior ( $q_{RCo}$ ) de la ventana, en forma de energía térmica, dependiendo de la temperatura interior y exterior de la edificación, así como de la velocidad del viento [24].

Otro parámetro que se debe considerar en la evaluación de un controlador de la radiación solar, es el coeficiente de sombreado (SC, *shading coefficient*). Éste parámetro se refiere a la cantidad de calor por radiación solar que se gana a través de un cristal específico, comparado al calor por radiación solar que se gana a través de un cristal claro de 3 mm de espesor, bajo las mismas condiciones [25].

$$SC = \frac{[q_i(T) + \tau G]_{\text{del vidrio a medir}}}{[q_i(T) + \tau G]_{\text{vidrio claro de 3 mm espesor}}} \quad (\text{A.18})$$

Existe un parámetro alternativo al coeficiente de sombreado que está actualmente en uso, es el coeficiente de ganancia de calor solar (SHGC, *Solar Heat Gain Coefficient*), el cual es una fracción obtenida de reemplazar el denominador de la ecuación (1.18) por  $G$ . El SHGC, una medida de la ganancia total de calor solar que incluye la radiación solar transmitida en ambas direcciones y el flujo de calor hacia el interior como resultado de la absorción del vidrio, tiene un efecto directo en el consumo de energía para el acondicionamiento del aire en edificios y en la capacidad de los sistemas de enfriamiento [26]. La relación de la transmitancia de luz visible del envidriado,  $T_{vis}$  y el SHGC se llama *ganancia solar de luz* (LSG). Los valores típicos para el LSG son de 1.25 a 2.0

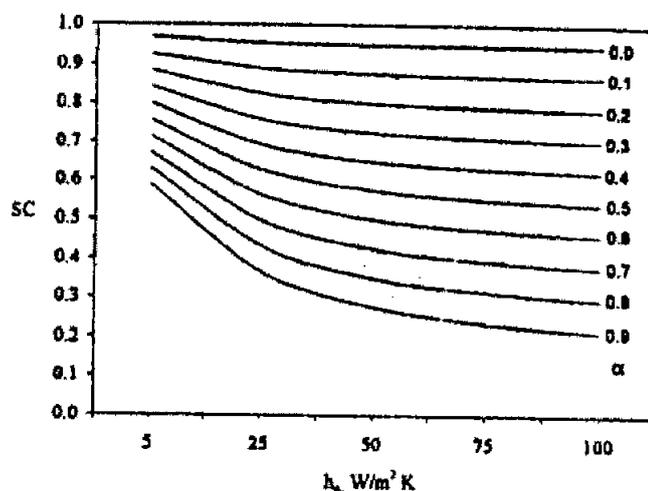
$$LSG = \frac{T_{vis}}{SHGC} \tag{A.19}$$

Existe además, una relación entre el SHGC y el SC, que esta dado por la relación [1]:

$$SC = \frac{SHGC}{0.87} \tag{A.20}$$

El SC del vidrio de referencia es de 1.0, por lo que el SHGC para este vidrio es de 0.87 a una incidencia normal y con un espectro solar estándar ASTM. Los valores deseables del coeficiente de sombreado para una película controladora de la radiación solar deben ser menores a 0.5 y cuando se alcanzan valores menores a 0.3 se dice que es un controlador de alta eficiencia. Este tipo de vidrios controladores de la radiación solar son de gran utilidad en ahorro de energía en los sistemas de acondicionamiento de aire en edificaciones; sin embargo, la poca iluminación que proporcionan estos, requiere de iluminación artificial durante el día, lo cual pone a discusión su validez o aprobación para su uso en ahorro de energía.

La Figura A.8 muestra un gráfico para determinar del coeficiente de sombreado en función de la absorción del vidrio laminado y el coeficiente convectivo de transferencia de calor.



**Figura A.8** Coeficiente de sombreado respecto al coeficiente convectivo de transferencia de calor y absorción ( $\alpha$ ) [27].

Se observa de la Figura A.8 que si el valor del coeficiente convectivo aumenta, el coeficiente de sombreado disminuye, además entre menor sea la absorción del vidrio ( $\alpha$ ) laminado, mayor será el coeficiente de sombreado.

## **A.6 Resistencia Adhesiva en Vidrios Laminados**

### ***Pruebas de Adhesión***

Como se mencionó en la revisión de literatura, la adhesión de la interfase vidrio / PVB juega un papel muy importante en la resistencia de los vidrios laminados. Para mantener los fragmentos de vidrio adheridos durante un impacto, se requiere de una buena adhesión del laminado. Sin embargo los valores de adhesión se deben controlar adecuadamente, ya que si el vidrio presenta una adhesión elevada ( $> 14-16$  MPa), su resistencia al impacto se reduce. Esto se debe a que la resistencia al impacto se logra a través del estiramiento y rompimiento de la hoja de PVB, lo cual no puede ocurrir si el PVB está muy restringido a causa de su adhesión al vidrio. Para una alta resistencia al impacto se prefieren niveles bajos de adhesión (5-10 MPa), que permiten más deformación de la hoja de PVB. Por tanto, se requiere balancear con un nivel de adhesión media, el funcionamiento satisfactorio de la retención del vidrio y la resistencia al impacto. Por esta razón, el control y la caracterización de la adhesión en los vidrios laminados de seguridad son de importancia crítica. Existen diversas técnicas para evaluar la resistencia adhesiva máxima de vidrios laminados, a continuación se hace una breve descripción de diversas pruebas de adhesión a vidrios laminados.

### ***Prueba de Adhesión Pummel***

La adhesión Pummel es una medida de la fuerza de unión entre la película de seguridad y el vidrio. La fuerza de unión del laminado se debe controlar para evitar grandes problemas de delaminación en una adhesión baja y fallas de impacto en una adhesión alta. Esta prueba se realiza en condiciones extremas de adhesión; esto es, el vidrio debe tener una temperatura de  $-18^{\circ}\text{C}$  [19]. La evaluación Pummel se lleva a cabo a temperatura ambiente, es decir, se extrae el vidrio laminado del refrigerador ( $-18^{\circ}\text{C}$ ) y se coloca en la máquina de Pummel, que opera a temperatura ambiente. El

procedimiento consiste en golpear repetidamente y en forma constante el vidrio laminado con un martillo de 16 onzas, en áreas de 12 mm x 18 mm. Cuando el borde de la primera línea de golpeo ha sido completamente pulverizado, se continúa con otra línea, golpeando de la misma forma (ver figura A.9). Se debe realizar la prueba en ambos lados del vidrio. Se debe tener cuidado de pulverizar todo el vidrio liso. Una vez terminada la prueba, se retiran con un cepillo las astillas y polvo de la muestra y se coloca sobre un cartón hasta que alcance una temperatura ambiente. Alcanzando ésta temperatura se evalúan, comparándolas a simple vista con patrones ya establecidos por normas internacionales. La clasificación de adhesión Pummel va del 0 al 10, que indican el porcentaje aproximado de área de PVB libre de vidrio, teniendo este último número el máximo nivel de adhesión. En la actualidad estas pruebas se realizan de forma automática, sin embargo, el criterio de evaluación sigue siendo el mismo.

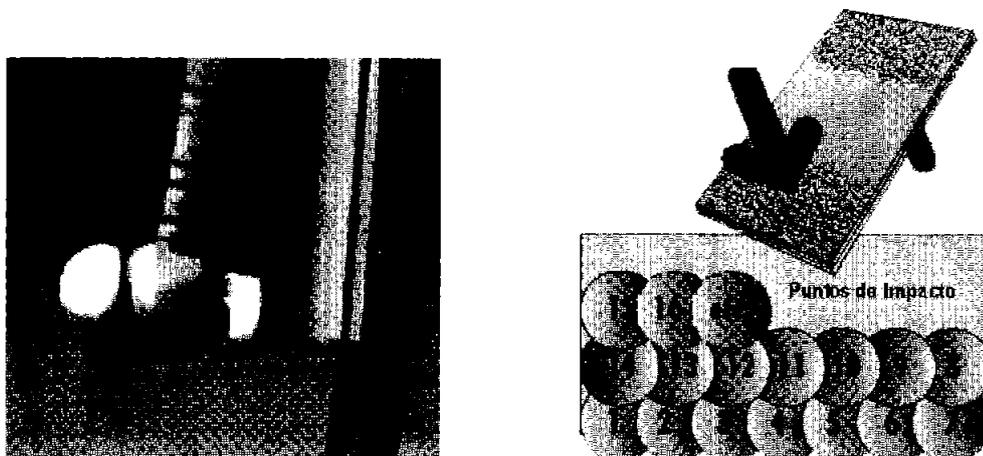
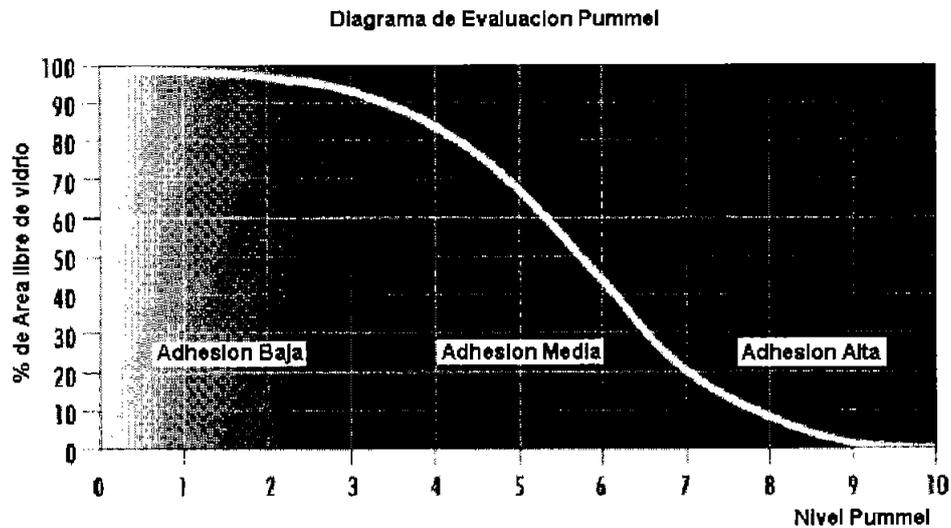


Figura A.9 Prueba de Pummel [19]

En la Figura A.10 se muestra la variación de la adhesión Pummel en función del vidrio desprendido de la muestra.

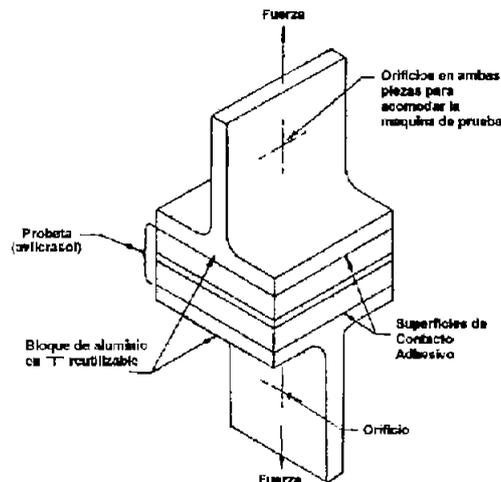


**Figura A.10** Diagrama de Evaluación Pummel [19]

Se observa que a medida que el porcentaje de vidrio desprendido del laminado es mayor, el nivel de adhesión se clasifica como bajo.

**Prueba de resistencia a la tensión de vidrio laminado plano**

Este método permite determinar el enlace adhesivo de vidrios laminados transparentes [28]. Generalmente, el laminado se fabrica con dos o más hojas de vidrio o plásticos duros, como acrílico (PMMA) o policarbonato (PC), unidos con un material elastomérico, usualmente PVB. Este método de prueba está pensado para proporcionar un medio con el cual determinar la resistencia del enlace adhesivo entre el vidrio o plástico y la hoja polimérica intermedia, bajo diferentes condiciones mecánicas y cargas térmicas.



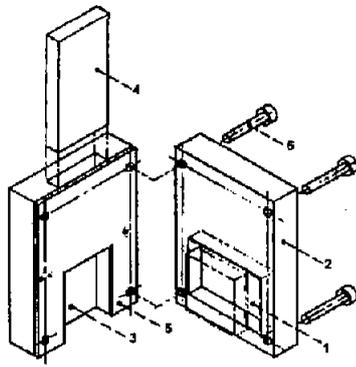
**Figura A.11** Dispositivo para pruebas de resistencia adhesiva [28].

En este tipo de prueba se utiliza un perfil de aluminio (24 ST) en forma de "T", con una base de 50 mm de lado. El cuerpo o alma del perfil de aluminio, tiene un orificio donde se colocan los pernos con los que se aplica la carga de tensión. La Figura A.10 muestra el elemento antes mencionado. En la base del perfil de aluminio, se unen por medio de un adhesivo los laminados que serán sometidos a la prueba de adhesión. La fuerza aplicada al laminado es perpendicular a las superficies adhesivas. La fuerza máxima a la que fallan los laminados se expresa en Pascales o libras fuerza por pulgada cuadrada.

Se debe utilizar una máquina universal o cualquier otro dispositivo similar que permita controlar la velocidad de la carga aplicada, además de un mecanismo capaz de mostrar la carga máxima aplicada al laminado con una exactitud de  $\pm 1.0\%$ . Las dimensiones del laminado deben ser de 50 mm por lado, preparado de tal manera que los extremos queden libres de astilladuras, es decir, lo más lisos posibles, para evitar fracturas prematuras durante la prueba. El laminado debe tener caras completamente paralelas. La prueba se debe realizar a una temperatura de  $23 \pm 2^\circ\text{C}$  y una humedad relativa de  $50 \pm 5\%$  y los laminados deben ambientarse al menos 24 horas con estas condiciones antes de realizar la prueba. A menos que se especifique lo contrario, se deben probar 5 laminados a una velocidad 1.25 mm/min. Si falla el adhesivo que une el laminado al perfil de aluminio, se descarta esta prueba y se debe probar otro laminado.

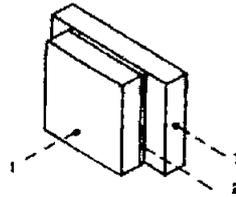
### ***Prueba de resistencia a corte interlaminar***

En este tipo de prueba [28], se aplica una carga paralela a la unión vidrio / PVB / vidrio para determinar la adhesión máxima o resistencia adhesiva entre el PVB y el vidrio. Estos valores se expresan en Mega Pascales (MPa) o libras por pulgada cuadrada (psi). Las Figuras A.12 y A.13 muestran los esquemas de este dispositivo para un vidrio laminado de tres elementos (v / PVB / v). La fijación de este dispositivo, debe ser tal que las caras del laminado queden firmemente soportadas entre el bloque estacionario y el móvil, para minimizar el efecto de pelado. El laminado debe tener 50 mm por lado como mínimo. Si se incrementa el tamaño del laminado se obtendrá una exactitud ligeramente mejor, hasta el punto en que las caras empiecen a fracturarse.



1. Laminado de 3 hojas (vidrio/PVB/vidrio)
2. Bloque de acero hembra
3. Bloque de acero macho
4. Barra p/ aplicación de carga
5. Calzas (PVB)
6. pernos

Figura A.12. Dispositivo para pruebas de resistencia adhesiva [28].



1. Hojas de vidrio
2. Hoja intermedia (PVB)

Figura A.13. Vidrio laminado de 3 hojas para prueba de corte [28].

### ***Prueba de ruptura por deslizamiento***

Este tipo de prueba [28] se utiliza cuando se quiere determinar el comportamiento de la carga aplicada con variación de condiciones ambientales. Se determina además el tiempo en que falla el laminado o su modo de falla con una carga dada. Los datos de la prueba de deslizamiento son de gran importancia en la predicción del funcionamiento de materiales con variaciones en diseño o en su hoja intermedia. La prueba se puede realizar a temperaturas elevadas o muy bajas. Esta prueba generalmente no es muy utilizada para el control de calidad a causa de los extensos periodos de tiempo que se requieren. La Figura A.14 muestra el dispositivo que se utiliza para la prueba de adhesión, así como la colocación excéntrica del laminado.

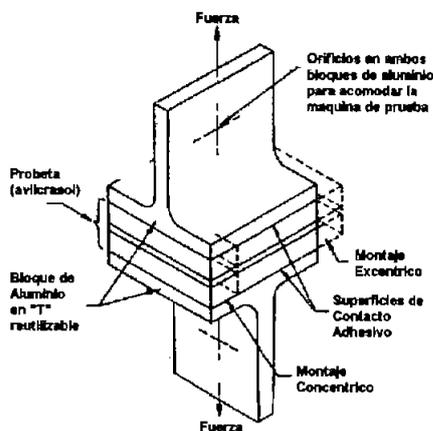
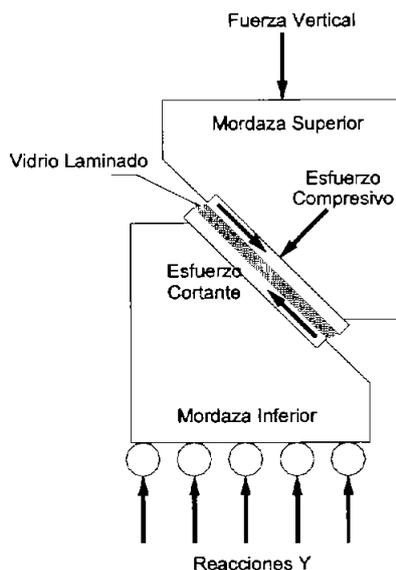


Figura A.14 Dispositivo para pruebas de ruptura por deslizamiento [28].

Para este tipo de prueba se puede utilizar una máquina universal con aplicación de carga de tensión constante. Esto permite utilizar un amplio rango de cargas, pero a causa de la larga duración de éstas, solo se pueden probar un número limitado de laminados. Los cambios de humedad y temperatura afectan a la hoja de PVB, produciendo datos erróneos.

### **Prueba de resistencia al corte compresivo**

Jagota *et al.* [28] utilizaron un método de prueba en donde se combinan esfuerzos cortantes y de compresión para caracterizar la adhesión de polímeros elastoméricos y sustratos rígidos. El método de prueba utilizado para evaluar la resistencia adhesiva de los *avilcrasol* consiste en aplicar una carga de compresión a un vidrio laminado de tres capas; vidrio / PVB / vidrio. El sistema de sujeción del vidrio tiene un ángulo de inclinación de  $45^\circ$ , por tanto la carga normal aplicada se descompone en dos fuerzas, una de compresión y otra de corte (ver figura A.15). Cuando la fuerza de corte aumenta, la deformación y los esfuerzos también aumentan hasta alcanzar un valor crítico, bajo el cual se inicia la falla en el laminado. Este valor crítico del esfuerzo se toma como una medida de la resistencia adhesiva y se usa rutinariamente para caracterizar la adhesión. Por tanto, en este trabajo se utiliza en concepto de *resistencia adhesiva* para caracterizar la adhesión máxima que presentan los *avilcrasol* al ser sometidos a la prueba de resistencia al corte-compresivo.



**Figura A.15** Esquema para Pruebas de Adhesión por Corte – Compresión (Modificación de la versión presentada por Jagota [28])

### ***Prueba de Altura Media de Falla (Método de Escalera)***

Todos las normas automotrices contienen una prueba de resistencia a la penetración, que prueba la fuerza de impacto de muestras de 30.5 X 30.5 cm (12" X 12") usando una esfera de acero de 2.27 kg (5 lb). Sin embargo, estas pruebas normalizadas son esencialmente pruebas de pasa / no pasa, usando la altura específica de una esfera que cae. La prueba de altura media de falla (MBH, *Mean Break Height*) se define como la altura de una esfera que cae, en la cual el 50% de las muestras sostendrán la bola y el 50% le permitirán que entre. Esto da además una medida cuantitativa de la fuerza de impacto del laminado [30].

Los vidrios utilizados en este tipo de prueba deben estar a una temperatura estándar de 21°C y se deben utilizar como mínimo 10 vidrios. La prueba consiste en colocar los vidrios antes mencionados sobre un soporte y posteriormente dejar caer la esfera de acero sobre éstos. El soporte del vidrio debe estar limpio y libre de astillas. Después del impacto, se retira el vidrio del soporte y se evalúa. Si la esfera atraviesa el vidrio, la prueba se considera como "no pasa"; en el caso de que el vidrio haya soportado el impacto, sin ser penetrado por la esfera, el resultado es "pasa". Si el vidrio sufrió rasgaduras en el PVB, éstas deben reportarse.

Si el resultado es “pasa”, se repite la prueba aumentando 0.5 m la altura de caída de la esfera. En caso contrario, se repite la prueba disminuyendo 0.5 m la altura de caída. Los resultados se tabulan y se obtiene el porcentaje de resistencia a la penetración, en función de la altura de prueba. Posteriormente se grafica la altura de falla contra el porcentaje de resistencia y se ajusta la recta, en la cual se determina la altura media de falla del laminado. Usualmente un vidrio laminado formado por dos hojas de vidrios claro de 2.2 mm de espesor unidos por una hoja polimérica de PVB y los cuales se utilizan para fabricar parabrisas automotrices, tienen una altura media de falla de 5.5 m a 6 m aproximadamente como estándar industrial.

### ***Prueba de Altura Media de Falla (Método de Absorción de Energía)***

El método de absorción de energía que determina la altura media de falla proporciona una precisión mayor que el método de escalera y utilizan menos muestras. Aplicando el principio de conservación de energía del impacto de una esfera de acero sobre un vidrio laminado, se muestra que la diferencia de la energía contenida por la esfera después de atravesar el vidrio laminado, es igual a la cantidad de energía absorbida por el laminado [30]. Esto es:

$$E_{Abs} = E_{Ent} - E_{Sal} \quad (A.21)$$

Cuando la esfera golpea el laminado, es posible calcular su energía a partir de la altura de caída. La energía de la esfera después de haber penetrado el laminado, se puede determinar midiendo su velocidad y sustituyéndola en la ecuación  $E_{sal} = \frac{1}{2} m v_{sal}^2$ . Cuando la esfera atraviesa el vidrio, dos bobinas colocadas debajo del laminado detectan su paso, ya que se interrumpe el campo magnético de éstas con el paso de la esfera. Se calcula el tiempo que le toma a la esfera pasar por las dos bobinas y con este tiempo se determina la velocidad y así determinar la energía absorbida por el impacto después de atravesar el vidrio de acuerdo a la ecuación (A.21). El promedio de las velocidades antes y después de atravesar el vidrio se utiliza para determinar la altura media de falla del vidrio laminado.

Cada una de las pruebas de adhesión presentadas anteriormente se revisó a detalle, con el propósito de elegir cual de ellas utilizar en esta investigación. Se eligió la prueba de resistencia al corte compresivo, descrita en el apartado 1.2.3, ya que en la Gerencia de Materiales y Procesos Químicos del Instituto de Investigaciones Eléctricas, se cuenta con un laboratorio mecánico equipado con todos los accesorios para llevarla a cabo, por tanto, no se requirió diseñar o construir equipo alguno. En el Capítulo 2 se describe el método de prueba de adhesión seleccionado con más detalle.

## Bibliografía

- [1] ASHRAE Handbook Fundamentals (1989).
- [2] ISO 9050:2003 **Standard Test Method: Glass in building — Determination of light transmittance, solar direct transmittance, total solar energy transmittance, ultraviolet transmittance and related glazing factors.**
- [3] G Alvarez, J J Flores, J O Aguilar, O Gomez-Daza, C.A. Estrada, M T S Fair and P. K. Nair, **Spectrally selective laminated glazing consisting of solar control and heat mirror coated glass: preparation, characterization and modelling of heat transfer**, *Solar Energy*, **78**(2005)113.
- [4] Nair P K, Nair M T S, Fernandez A and Ocampo M, **Prospects of chemically deposited metal chalcogenide thin films for solar control applications**, *J. Phys. D: Appl. Phys*, **22** (1989)829.
- [5] Nair M T S and Nair P K, **Chemical bath deposition of  $\text{Cu}_x\text{S}$  thin films and their prospective large area applications**, *Semicond. Sci. Technol.* **4** (1989)191.
- [6] Nair P K and Nair M T S, **Versatile solar control characteristics of chemically deposited  $\text{PbS-Cu}_x\text{S}$  thin films combinations**, *Semicond. Sci. Technol.* **4** (1989)807.
- [7] Nair M T S and Nair P K, **Near-ideal solar control characteristics of  $\text{Cu}_x\text{S}$  thin films**, *Semicond. Sci. Technol.* **4** (1989)599.
- [8] Garcia V M, Nair M T S and Nair P K, **Optical properties of  $\text{PbS-Cu}_x\text{S}$  and  $\text{Bi}_5\text{S}_3\text{-Cu}_x\text{S}$  thin films with reference to solar control and solar absorber applications**, *Solar Energy Materials* **23** (1991)47.

- [9] Nair P K, Garcia V M, Fernandez A M, Ruiz H S and Nair M T S, **Optimization of chemically deposited  $\text{Cu}_x\text{S}$  solar control coatings**, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **24** (1991)441.
- [10] Fernandez A and Nair P K; **Characteristics of metal chalcogenide solar control films with a protective polymer coating**, *Thin Solid Films*, **204** (1991)459.
- [11] Nair P K, Nair M T S, Gómez-Daza O, García V M, Castillo A, Arenas O L, Peña Y, and Guerrero L, **Laminated solar control safety glass incorporating chemically deposited metal chalcogenide thin films**, *The International Society for optical Engineering, Bellingham, Proc. SPIE* (1997)186.
- [12] Cuevas O, Tamariz J, Gomez-Daza O, Campos J, Nair M T S and Nair P K, **Control de la radiación solar mediante películas delgadas de  $\text{CuS}$ , depositadas químicamente**, Memorias 22 Semana Nacional de Energía Solar, ANES, (1998)268.
- [13] Correa M G, **Fabricación de filtros solares para ahorro de energía con recubrimientos de  $\text{Cu}_2\text{O-CuS}$  y  $\text{VO}_2$** , Tesis de Doctorado, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México (2002)17.
- [14] Pain H J, **The Physics of vibrations and waves**, Editorial Wiley, Segunda Edición, 1976.
- [15] Smith R A, *Semiconductors*, 2<sup>nd</sup> ed. (Cambridge University Press, Great Britain 1978)309-326.
- [16] <http://www.saflex.com/pages/technical/security/s1considerations.asp#WhatisSecurityGlazing>
- [17] <http://www.blindajesalemanes.com/espanol/blindajes/niveles.htm>
- [18] [http://www.cristacurva.com.mx/esp/cristal\\_protecto\\_info.htm](http://www.cristacurva.com.mx/esp/cristal_protecto_info.htm)
- [19] [www.trosifol.com](http://www.trosifol.com)
- [20] Chopra K L and Das S R, **Thin films solar cells**, Plenum Press, New York and London (1983).
- [21] Chopra K L, Kainthla R C, Pandya D K, Takoor A P, Hass G; Francombe M H and Vossen J L (Eds.), *Physics of Thin Films*, Vol. 12, Academic Press, New York (1982).

- 
- [22] Nair P K, Parmananda P, Nair M T S, **Mathematical model simulating the growth of compound semiconductor thin films via chemical bath deposition**, *J. of Cryst. Growth*, **206** (1999)68.
- [23] Avrami M , *J. Chem. Phys.*, **9** (1941)177.
- [24] Estrada G C, Alvarez G G and Nair P K, **Thermal performance of an architectural window with chemically deposited SnS-Cu<sub>x</sub>S solar control coating**, *Renewable Energy*, **3** (1993)683.
- [25] Alvarez G G, Flores J J and Nair P K, **Influence of thermal emittance on the performance of laminated solar control glazing**, *Appl. Thermal Engineering* **21**(2001)1813.
- [26] U.S. Department of Energy report DOE/EE-0173 (August 1998): *Spectrally selective glazings*, contacts: <http://www.eren.doe.gov/femp> and [theodor.collins@hq.doe.gov](mailto:theodor.collins@hq.doe.gov) or [eslee@lbl.gov](mailto:eslee@lbl.gov)
- [27] Alvarez G G, Flores J J and Estrada C A, **The termal response of laminated glass with solar control coating**, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **31**(1998)3057.
- [28] ASTM Standard F 521-83 (re-approved 1997), **Standard Test Methods for Bond Integrity of Transparent Laminated.**
- [29] Jagota A, Bennison S J and Smith C A, **Analysis of a Compressive Test for Adhesion Between Elastomeric Polymers and Rigid Substrates**, *Int. J. Fracture*, **104**, (2000)105
- [30] Saflex, **Guía de Laminación**, versión LW 2.0.

## APÉNDICE B

### Análisis de Varianza a Pruebas de Resistencia Adhesiva

Para determinar si las variaciones en los valores de la resistencia adhesiva de los *avilcrasol* era significativa entre uno a otro, se decidió realizar un análisis de varianza. El análisis estadístico consiste en determinar la variación que hay entre las medias (Prueba F) y las desviaciones estándar (Prueba *t* de student). A continuación se describen ambas.

#### Prueba *t* de student

La prueba *t* de student es una prueba paramétrica de la diferencia entre dos muestras, con la hipótesis nula ( $H_0$ ) siendo que los dos juegos de datos son muestras aleatorias de una población normalmente distribuida, o dos muestras idénticas de poblaciones normalmente distribuidas. La hipótesis alternativa ( $H_1$ ) es que existe una diferencia entre las medias de las dos poblaciones, lo cual se refleja con precisión en las muestras bajo estudio. Verma [1] recomienda utilizar un nivel de significancia de 0.01 o mejores.

La prueba estadística *t* se debe calcular primero usando la siguiente ecuación (las dos muestras consisten respectivamente de  $n_x$  y  $n_y$  datos, con las respectivas medias  $\bar{x}$  y  $\bar{y}$  y desviaciones estándar  $s_x$  y  $s_y$ ).

$$t = \frac{|\bar{x} - \bar{y}|}{s \sqrt{\left(\frac{1}{n_x} + \frac{1}{n_y}\right)}} \quad (\text{B.1})$$

donde  $|\bar{x} - \bar{y}|$  es la diferencia absoluta entre las dos medias, y  $s$  es la desviación estándar combinada de las dos muestras, y se determina de:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n_x} (x_i - \bar{x})^2 + \sum_{i=1}^{n_y} (y_i - \bar{y})^2}{(n_x + n_y - 2)}} \quad (\text{B.2})$$

Alternativamente, si no están disponibles los datos individuales, y se pueden utilizar las desviaciones estándar respectivas, entonces se tiene que:

$$s = \sqrt{\frac{(n_x - 1)s_x^2 + (n_y - 1)s_y^2}{(n_x + n_y - 2)}} \quad (\text{B.3})$$

Note que  $(n_x + n_y - 2)$  proporciona los grados de libertad para el valor  $t$ . La hipótesis  $H_0$  se rechaza (se acepta la hipótesis alternativa  $H_1$ ) si el valor calculado  $t$  (usando las ecuaciones B.1 y 2 o B.1 y 3) es más grande que el valor tabulado para el valor  $t$  de student de dos colas para un nivel de significancia elegido (por ejemplo 0.01 o 0.001). De otra manera, la hipótesis nula  $H_0$  se debe tomar como verdadera.

### Prueba F

El análisis de varianza (ANOVA) o prueba F es una prueba paramétrica estándar entre tres o más muestras. Tales pruebas también pueden ser aplicadas entre pares de muestras (prueba  $t$  de student). Las dos hipótesis (nula  $H_0$ : las muestras vienen de una población común, y la alternativa  $H_1$ : las muestras vienen de poblaciones diferentes) se definen similarmente. La razón de un análisis de varianza es encontrar si hay más variación entre muestras que entre ellas mismas. Bajo la hipótesis nula  $H_0$  es razonable esperar que la variación de la muestras es casi la misma que la variación entre muestras. Se hacen primero dos estimaciones de la varianza de la supuesta población común: la variancia estimada dentro de la muestra, y la variancia estimada entre muestras.

Se tiene así que, si  $k$  es el número de muestras,  $n_i$  es el número de datos individuales en cada muestra y  $\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_k$  son los valores de las respectivas medias, la variancia estimada dentro de la muestra es:

$$\bar{s}_W^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n_1} (x_i - \bar{x}_1)^2 + \sum_{i=1}^{n_2} (x_i - \bar{x}_2)^2 + \dots + \sum_{i=1}^{n_k} (x_i - \bar{x}_k)^2}{N - k} \quad (\text{B.4})$$

donde  $N$  es el número total de los valores de datos individuales en todas las muestras, y  $(N-k)$  los grados de libertad para la variancia dentro de las muestras. La estimación de la variancia entre muestras es:

$$\bar{s}_B^2 = \frac{n_1(\bar{x}_1 - \bar{x}_g)^2 + n_2(\bar{x}_2 - \bar{x}_g)^2 + \dots + n_k(\bar{x}_k - \bar{x}_g)^2}{k-1} \quad (\text{B.5})$$

donde  $\bar{x}_g$  es la gran media de todos los datos (media de todos los datos de todas las  $k$  muestras juntas), y  $(k-1)$  son los grados de libertad para la varianza entre muestras.

Habiendo calculado las dos estimaciones de la varianza, la razón  $F$  se calcula de:

$$F = \frac{\bar{s}_B^2}{\bar{s}_W^2} \quad (\text{B.6})$$

El valor crítico de  $F$  con un nivel de significancia elegido (0.01 o 0.001) con  $(k-1)$  y  $(N-k)$  grados de libertad (Ebdon, 1988 o cualquier otro libro de texto) se compara con el valor  $F$  calculado. Se rechaza  $H_0$  si el valor calculado de  $F$  es más grande que el valor crítico.

### **Bibliografía**

- [1] Verma S P, **Optimisation of the exploration and evaluation of geothermal resources**, In: **D. Chandrasekharam and J. Bundschulh (Eds.) "Geothermal Energy Resources for Developing Countries"**, p. 195-224, Swets & Zeitlinger B. V., A. A. Balkema Publishers, Rotterdam, The Netherlands.

**APÉNDICE C****Diseño de la Pistola de Aire para Pruebas de Impacto**

Este tipo de prueba consiste en impactar un proyectil de 2 gramos sobre el vidrio laminado a velocidades que van de 35 a 45 ms<sup>-1</sup> (126 y 162 kmh<sup>-1</sup>). En este tipo de prueba se utiliza el concepto de diseño llamado “*hoja de sacrificio*”, el cuál propone que la hoja de vidrio exterior del laminado debe romperse al impacto de los proyectiles, no así la hoja interior, que debe quedar íntegra para soportar las cargas de viento durante la tormenta o huracán.

Para llevar a cabo las pruebas de impacto a baja velocidad se tuvo que diseñar una pistola de aire para este propósito. Las dimensiones de la pistola de aire se obtuvieron mediante los cálculos correspondientes, con base en la velocidad de la bala. Partiendo de la segunda ley de Newton y de la ecuación de presión tenemos que:

$$F = ma \quad (C.1)$$

$$P = \frac{F}{A} \quad (C.2)$$

despejando F de C.1 y C.2 e igualando en F tenemos

$$PA = ma \quad (C.3)$$

sabiendo que

$$d = \frac{1}{2}at^2 \quad (C.4)$$

y que

$$t = \frac{d}{v} \quad (C.5)$$

sustituyendo C.5 en C.4, se tiene

$$a = \frac{2v^2}{d} \quad (C.6)$$

sustituyendo a en C.3

$$PA = \frac{2mv^2}{d} \quad (C.7)$$

despejando d, tenemos

$$d = \frac{2mv^2}{PA} \quad (C.8)$$

Con la ecuación C.8 se puede determinar la distancia que debe tener el cañón de la pistola, con base en su área, la presión de aire, la masa del proyectil y la velocidad a la que se requiere impulsar la bala. En la Figura C.1 se observa un dibujo esquemático de la pistola de aire para pruebas de impacto.

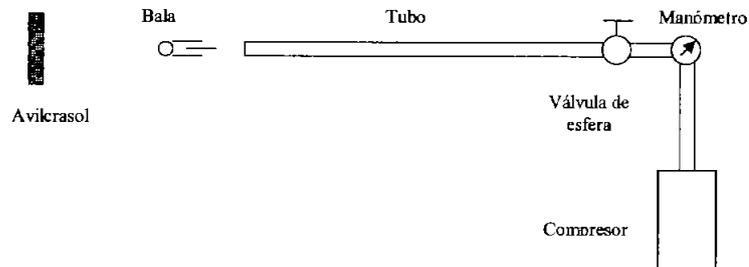


Figura C.1 Esquema de la pistola de aire para pruebas de impacto.

La velocidad de la bala se midió mediante dos sensores láser, los cuales se instrumentaron a un osciloscopio. Éstos se instalaron a la salida del cañón de la pistola, a una distancia determinada y con ellos se determinó el tiempo que tarda la bala en cruzarlos. La velocidad de la bala se determinó con la distancia entre sensores y el tiempo medido.

**APÉNDICE D**

**Irradiancia Solar para Cinco Ciudades de Aplicación de los Avilcrasol**

**Tabla D1.** Promedios de radiación solar (máximos pico) mensual en una superficie vertical ubicada en cinco ciudades deferentes.

Día	Mes	G [W/m <sup>2</sup> ]	AM	Acimut (°)	Ang. Incl. (°)	Declinación (°)
	<b>Acapulco (16.83°, 100.25°)</b>					
17	Enero	646	1.27	0	52.13	-21.04
16	Febrero	578	1.16	0	59.85	-13.32
16	Marzo	444	1.06	0	70.16	-3.01
15	Abril	256	1.01	0.01	81.88	8.71
15	Mayo	128	1.00	179.99	91.39	18.22
11	Junio	125	1.01	179.97	96.04	22.87
17	Julio	131	1.00	179.99	94.87	21.70
16	Agosto	162	1.00	0.02	87.78	14.61
15	Septiembre	334	1.03	0	76.98	3.81
15	Octubre	528	1.10	0	65.22	-7.95
14	Noviembre	644	1.21	0	55.47	-17.70
10	diciembre	697	1.29	0	50.59	-22.58
	<b>Cancún (21.13°, 86.83°)</b>					
17	Enero	679	1.35	0	47.82	-21.05
16	Febrero	625	1.21	0	55.55	-13.32
16	Marzo	503	1.10	0	65.84	-3.03
15	Abril	325	1.02	0	77.57	8.7
15	Mayo	179	1.00	-0.01	87.08	18.21
11	Junio	123	1.00	179.98	91.71	22.87
17	Julio	128	1.00	179.92	90.58	21.71
16	Agosto	234	1.01	0.02	83.49	14.62
15	Septiembre	399	1.05	0.01	72.7	3.83
15	Octubre	584	1.14	0	60.93	-7.94
14	Noviembre	684	1.28	0	51.18	-17.69
10	diciembre	728	1.38	0	46.3	-22.57
	<b>Huatulco (15.45°, 96.11°)</b>					
17	Enero	634	1.24	0	53.51	-21.04
16	Febrero	562	1.14	0	61.23	-13.32
16	Marzo	424	1.05	0	71.54	-3.01
15	Abril	234	1.01	0	83.26	8.71
15	Mayo	129	1.00	179.95	92.77	18.22
11	Junio	126	1.01	180	97.42	22.87
17	Julio	131	1.01	179.97	96.25	21.7
16	Agosto	138	1.00	0.22	89.16	14.61
15	Septiembre	312	1.02	0.01	78.36	3.81
15	Octubre	509	1.09	0	66.6	-7.95

14	Noviembre	630	1.19	0	56.85	-17.7
10	diciembre	685	1.27	0	51.97	-22.58

Continuación Tabla D.1

Día	Mes	$I_R$ [W/m <sup>2</sup> ]	AM	Acimut (°)	Ang. Incl. (°)	Declinación (°)
	<b>Tampico (22.23°, 97.85)</b>					
17	Enero	686	1.37	0	46.73	-21.04
16	Febrero	636	1.23	0	54.45	-13.32
16	Marzo	518	1.11	0	64.76	-3.01
15	Abril	342	1.03	0.01	76.48	8.71
15	Mayo	198	1.00	0	85.99	18.22
11	Junio	122	1.00	179.72	90.64	22.87
17	Julio	137	1.00	0.06	89.47	21.7
16	Agosto	253	1.01	0.01	82.38	14.61
15	Septiembre	415	1.05	0	71.58	3.81
15	Octubre	597	1.16	0	59.82	-7.95
14	Noviembre	694	1.30	0	50.07	-17.7
10	diciembre	735	1.41	0	45.19	-22.58
	<b>Tijuana (34.56°, 117.11°)</b>					
17	Enero	732	1.77	0	34.39	-21.05
16	Febrero	733	1.49	0	42.12	-13.32
16	Marzo	654	1.26	0	52.41	-3.03
15	Abril	511	1.11	0	64.5	9.06
15	Mayo	405	1.04	0	73.65	18.21
11	Junio	316	1.02	0	78.31	22.87
17	Julio	352	1.03	0	77.15	21.71
16	Agosto	446	1.06	0	70.06	14.62
15	Septiembre	575	1.16	0	59.27	3.85
15	Octubre	715	1.36	0	47.5	-7.94
14	Noviembre	765	1.63	0	37.75	-17.69
10	diciembre	770	1.84	0	32.87	-22.57

Los valores anteriores fueron obtenidos del Software SunPlot 3D, *Sun Position Program for the Solar Energy System Engineer*, Maui Solar Energy Software Corporation, Copyright © 2000.