



UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO
DIVISIÓN DE CIENCIAS E INGENIERÍA

**RESISTENCIA ADHESIVA INTERFACIAL EN VIDRIOS LAMINADOS
CON CuS SOBRE PET**

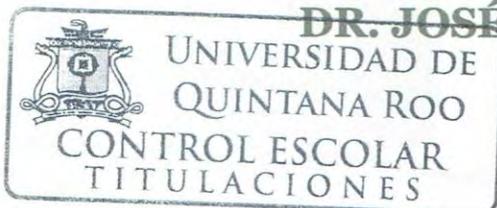
TESIS
PARA OBTENER EL GRADO DE
INGENIERO EN SISTEMAS DE ENERGÍA

CARRERA
INGENIERÍA EN SISTEMAS DE ENERGÍA

PRESENTA
MARVIN GEOVANNY CARRASCO DE LA FUENTE

DIRECTOR DE TESIS
DR. JORGE OVIDIO AGUILAR AGUILAR

ASESORES
DRA. CECILIA LÓPEZ MATA
DR. INOCENTE BOJÓRQUEZ BÁEZ
DR. JAIME D. CUEVAS DOMÍNGUEZ
DR. JOSÉ HERNÁNDEZ RODRÍGUEZ



CHETUMAL QUINTANA ROO, MÉXICO, DICIEMBRE DE 2018



UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO
DIVISIÓN DE CIENCIAS E INGENIERÍA

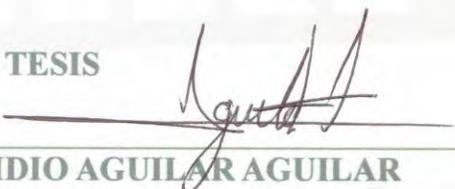
TRABAJO DE TESIS TITULADO
"RESISTENCIA ADHESIVA INTERFACIAL EN VIDRIOS LAMINADOS CON CuS SOBRE PET"

ELABORADO POR
MARVIN GEOVANNY CARRASCO DE LA FUENTE

BAJO SUPERVISIÓN DEL COMITÉ DE ASESORÍA Y APROBADO COMO REQUISITO
PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE:
INGENIERO EN SISTEMAS DE ENERGÍA

COMITÉ DE TESIS

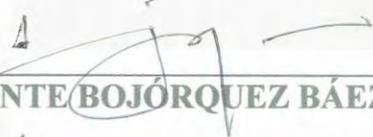
DIRECTOR:


DR. JORGE OVIDIO AGUILAR AGUILAR

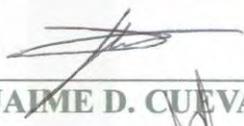
ASESOR:


DRA. CECILIA LÓPEZ MATA

ASESOR:

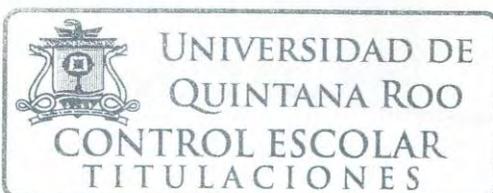

DR. INOCENTE BOJÓRQUEZ BÁEZ

ASESOR:


DR. JAIME D. CUEVAS DOMÍNGUEZ

ASESOR:


DR. JOSÉ HERNÁNDEZ RODRÍGUEZ



CHETUMAL QUINTANA ROO, MÉXICO, DICIEMBRE DE 2018

DEDICATORIA.

Mis padres, mi esposa, mis hijas y mi hermana
por el apoyo incondicional que siempre me han brindado.



AGRADECIMIENTOS.

En primer lugar, agradezco a dios por las bendiciones otorgadas y el camino que ha elegido para mí.

Este trabajo no es sólo mío, ya que sin la valiosa ayuda y apoyo de muchas personas a lo largo de esta travesía, esto no se habría culminado. Uno de los principales personajes, el Dr. Jorge Ovidio Aguilar Aguilar mi director de tesis que me brindó su valioso tiempo y enseñanzas, además de ser un modelo a seguir como ser humano y profesionalista. Sin su gran apoyo esto no sería realidad.

A mis asesores, la Dra. Cecilia López Mata, el Dr. Inocente Bojórquez Báez, el Dr. Jaime D. Cuevas Domínguez, el Dr. José Hernández Rodríguez, por su apoyo en este trabajo y culminar la carrera.

A todos mis profesores por sus enseñanzas durante mis estudios universitarios, ya que cada uno de ellos me preparó para poder realizar este trabajo. A mis compañeros de generación y a mis amigos: Freddy, Geovanni (†), Josué, David, Dalia y Marisol con los cuales compartí inmemorables aventuras como universitario.

Al Instituto de Investigación en Energía (antes Centro de Investigación en Energía) de la Universidad Autónoma de México, por su apoyo y las facilidades para llevar a cabo el desarrollo de las películas delgadas semiconductoras en sus instalaciones.

Al Ing. Reynaldo Aguilar Santoyo, su esposa la Lic. Wendy Karina Ramírez Blanco y al Instituto Wozniak por las facilidades para poder culminar este trabajo.

A mi madre la señora Leticia de la Fuente reyes y mi padre el señor Enrique Carrasco Nuñez (†), por todas sus enseñanzas y su constante motivación, ya que sin ellos nada de esto hubiese sido posible. Siempre han sido un ejemplo a seguir.

A mi esposa Giany Patricia Sánchez Pool por su valioso apoyo, constante motivación y por ser mi compañera de vida. A mis hijas Giannina Solange Carrasco Sánchez y Giovanna Isabella Carrasco Sánchez por alegrarme la vida todos los días con sus inquietudes y ocurrencias.



CONTENIDO.

Dedicatoria.....	I
Agradecimientos.....	II
Contenido.....	IV
Listado de tablas.....	VI
Listado de figuras.....	VII
Abreviaturas.....	VIII
Introducción.....	1
Objetivos.....	4
Descripción capitular.....	5
Capítulo 1. Antecedentes.....	6
1.1 Vidrios laminados de control solar.....	11
1.2 Películas Delgadas Semiconductoras (PDS) de control solar.....	12
1.3 Métodos de obtención de películas delgadas semiconductoras y substratos para el depósito de las PDS.....	12
1.4 Propiedades mecánicas de vidrios laminados.....	14
Capítulo 2. Metodología para el desarrollo de los vidrios laminados.....	16
2.1 Configuración del vidrio laminado.....	16
2.1.1 Tereftalato de polietileno (PET).....	18
2.1.2 Polivinil Butiral (PVB).....	18
2.2 Depósito de baño químico de las PDS de CuS sobre hojas de PET.....	21
2.3 Proceso de laminación de vidrios.....	23
2.3.1 Pre-laminación por rodillos.....	23
2.3.2 Proceso de laminación.....	25
2.4 Pruebas mecánicas.....	25
2.4.1 Pruebas de adhesión.....	26
2.5 Conclusiones.....	27
Capítulo 3. Desarrollo experimental.....	28
3.1 Depósito de PDS de CuS sobre PET.....	28
3.1.1 Hoja de PET con PDS de CuS depositada por 1 hora en un lado.....	29
3.1.2 Hoja de PET con PDS de CuS depositada por 1 hora en ambos lados.....	30
3.1.3 Hoja de PET con PDS de CuS depositada por 2 horas en un lado.....	31



3.1.4 Hoja de PET con PDS de CuS depositada por 2 horas en ambos lados.....	31
3.2 Caracterización óptica de películas de control solar.....	32
3.3 Pre-laminación y laminación de los vidrios.....	32
3.4 Caracterización del sistema para pruebas de resistencia adhesiva.....	33
3.4.1 Preparación de muestras.....	34
3.4.2 Pruebas de resistencia adhesiva.....	38
3.5 Conclusiones.....	39
Capítulo 4. Resultados y análisis de resultados.....	40
4.1 Descripción de los experimentos.....	40
4.2 Propiedades ópticas de vidrios laminados de control solar.....	41
4.3 Resistencia adhesiva interfacial en vidrios laminados, experimental.....	44
4.4 Resistencia adhesiva interfacial en vidrios laminados, analítica.....	46
4.5 Conclusiones finales del trabajo.....	48
Bibliografía.....	49
ANEXOS.....	53

**LISTADO DE TABLAS.**

Tabla 2.1 Solución de 5333.32 ml para DBQ.....	22
Tabla 3.1 Solución de 6000 ml para DBQ.....	30
Tabla 3.2 Solución de 5333.32 ml para DBQ.....	31
Tabla 3.3 Películas delgadas semiconductoras depositadas en las hojas de PET..	32
Tabla 3.4 Formato para registrar la resistencia adhesiva interfacial en vidrios laminados de control solar.....	38
Tabla 4.1 Configuraciones de vidrios laminados de control solar evaluados a resistencia adhesiva interfacial.....	41
Tabla 4.2 Trabajo de adhesión y esfuerzo espontáneo de fractura de las uniones adhesivas en un vidrio laminado.....	47
Tabla 4.3 Esfuerzo adhesivo total en laminados.....	47



LISTADO DE FIGURAS.

Figura 1.1 Ganancia térmica en vidrios.....	8
Figura 2.1 Configuración de los vidrios laminados con recubrimiento laminado de control solar.....	17
Figura 2.2 Estructura química del tereftalato de polietileno (PET).....	18
Figura 2.3 Estructura química del polivinil butiral (PVB).....	19
Figura 2.4 Variación del contenido de humedad del PVB respecto a la humedad relativa del aire.....	20
Figura 2.5 Relación del contenido de humedad de PVB respecto al esfuerzo cortante máximo.....	20
Figura 2.6 Proceso de Pre-laminación por rodillos.....	24
Figura 2.7 Emparedados de vidrios laminados con depósito de PDS en uno y ambos lados.....	24
Figura 2.8 Dispositivo para pruebas de adhesión.....	26
Figura 3.1 Deposito de baño químico realizado en el Instituto de Energías Renovables (antes Centro de Investigación en Energía) de la UNAM	29
Figura 3.2 Esquema de corte de las hojas de PET con PDS de CuS.....	33
Figura 3.3 Esquema del corte de vidrio de 30 x 30 cm y las 16 zonas seleccionadas para las pruebas de resistencia adhesiva	35
Figura 3.4 Corte de vidrios con taladro con broca de punta de diamante de 30 mm de diámetro.....	36
Figura 3.5 Probetas de vidrio laminado de control solar obtenidas para las pruebas de resistencia adhesiva interfacial.....	36
Figura 3.6 Clasificación de probetas obtenidas para las pruebas de resistencia Adhesiva.....	37
Figura 4.1 a) Transmitancia óptica, b) Reflectancia especular de películas de control solar de CuS depositados sobre hojas de PET y en uno y ambos lados por 1h y 2h.....	41
Figura 4.2 Resistencia adhesiva interfacial en vidrios laminados de control solar	45

**ABREVIATURAS.**

CIR: Cercano Infrarrojo.

CuS: Sulfuro de Cobre

DBQ: Depósito de Baño Químico.

GEI: Gases de efecto invernadero

PDS: Película Delgada Semiconductora.

PET: Tereftalato de Polietileno.

PVB: Polivinil Butiral.

R_{vis}: Reflectancia de la región ultravioleta visible.

T_{vis}: Transmitancia de la región ultravioleta visible.

UV_{vis}: Ultravioleta de la región visible.

V: Vidrio

VCS: Vidrio de Control Solar.



INTRODUCCIÓN.

La energía ha sido, es y seguirá siendo un factor primordial para el desarrollo económico y social de México. Por tanto, es indispensable aprovechar los recursos energéticos con los que contamos de manera eficiente y sustentable.

Esto podrá ser posible, si la sociedad y el gobierno se enfocan en la búsqueda de fuentes alternas de energía como las renovables o mediante la promoción de programas de ahorro de energía para lograr la sustentabilidad energética y ambiental a mediano plazo [1].

Cabe recordar que, en la actualidad, es imprescindible el ahorro de energía; ya que los impactos ambientales derivados del uso indiscriminado de energéticos, ha llegado a niveles críticos. Puesto que la generación de energía eléctrica, es una de las industrias que emite grandes emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), provocando afectaciones colaterales al cambio climático [2].

Por lo tanto, es necesario crear áreas de oportunidad en el ahorro energético, como es el uso de la bioclimática en la arquitectura, ya que existe una amplia gama de posibilidades para el aprovechamiento de las variables climatológicas del país, entre ellas: la conservación de energía por medio de sistemas pasivos, iluminación natural, control de la ventilación, por mencionar algunos [3].

La conservación de energía, es un campo que ha sido estudiado ampliamente. Hoy día existe una gran variedad de elementos en esta área. Algunos ejemplos por mencionar son el ahorro de energía a través de las ventanas en edificios, como son los vidrios atérmicos o absorbedores, reflectivos, de baja emisividad, ventanas inteligentes y envidriados fotovoltaicos entre otros [4].

Haciendo enfoque en el uso de ventanas inteligentes, o conocidos como vidrios de control solar (VCS), éstos tienen la capacidad de reducir la cantidad de radiación



solar al interior reduciendo así el calentamiento por efecto invernadero y por ende también se obtiene una reducción del uso de energía por sistemas de acondicionamiento del aire. Sin embargo, existe un gran desconocimiento por el sector de la construcción de este tipo de dispositivos y su uso no se ha masificado en México.

Lamentablemente, las nuevas tendencias arquitectónicas se alejan del diseño de fachadas de vidrio con alta reflexión y buscan cada vez más la transparencia en los edificios, tratando de integrar los espacios interiores con el ambiente exterior, diseñando fachadas transparentes con mayores superficies de vidrio. Lo que resulta en un alto costo, no sólo en la cuestión del requerimiento de equipos de refrigeración para confort de los habitantes, sino en el alto costo ambiental que esto produce.

Dicho costo ambiental, se ve reflejado en las enormes cantidades de CO₂ (dióxido de carbono) que se generan en los nuevos edificios residenciales, que día a día han incrementado en el uso de aires acondicionados. Un ejemplo es que, en el año 2007 los jefes de gobierno de Estados Unidos, se han visto obligados a ahorrar 300 millones de toneladas de CO₂ en los edificios residenciales para el 2020. Esto con el objetivo de no recurrir a la compra de bonos de carbono y con ello evitar elevar los precios de los servicios [5].

Cabe destacar que el uso de VCS puede ayudar a disminuir la generación de gases de efecto invernadero. Pero a pesar de las buenas características solares que poseen, existe cierto recelo en su uso en las áreas tropicales, ya que la mayoría de éstos no son de seguridad, es decir, se rompen al impacto de proyectiles a baja velocidad, por ejemplo, piedras que arrastra el viento durante un viento fuerte o un huracán.

Como una contribución a la problemática mencionada anteriormente, en este trabajo se presentan las propiedades ópticas y mecánicas de vidrios laminados con



películas semiconductoras de control solar, los cuales además, funcionan como vidrios de seguridad ante robos, ataques vandálicos o impacto de proyectiles y cargas de viento durante huracanes y tormentas [6].



OBJETIVOS.

OBJETIVO GENERAL.

- ▣ Evaluar la resistencia adhesiva interfacial en vidrios laminados que incorporan hojas de PET con películas delgadas de CuS.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

- ▣ Desarrollar películas delgadas semiconductoras por el método de depósito por baño químico.
- ▣ Desarrollar vidrios laminados de control solar por Pre-laminación por Rodillos y proceso de Laminación en autoclave.
- ▣ Realizar pruebas experimentales de resistencia adhesiva en vidrios laminados de control solar.



Descripción Capitular.

La descripción capitular de este trabajo de investigación, comienza con el capítulo 1, con una introducción general y antecedentes. Haciendo mención del uso de vidrios laminados y su ganancia térmica en las edificaciones, Asimismo se presenta una breve definición de las películas delgadas y los métodos de obtención de las mismas. Se describe los sustratos para depositar películas delgadas semiconductoras y las propiedades mecánicas de cada uno.

En el capítulo 2 se describe la metodología para el desarrollo de vidrios laminados y las configuraciones de los mismos (los cuales llamaremos emparedados). Se hace una breve definición del tereftalato de polietileno (PET) y el polivinil butiral (PVB), en el caso del segundo se describe su importancia para las propiedades mecánicas de los vidrios laminados. Al igual de manera general se describe el procedimiento para la obtención de vidrios laminados de control solar.

Posteriormente, en el capítulo 3, se presenta el desarrollo experimental. Se describe el depósito de las películas delgadas semiconductoras (PDS) sobre las hojas de PET para las diferentes configuraciones de vidrios laminados de control solar. Se menciona la caracterización óptica de las PDS, la laminación de los emparedados y la caracterización de las pruebas mecánicas.

Por último, en el capítulo 4 se presentan los resultados obtenidos y el análisis de los mismos. Se finaliza con una conclusión, al igual que en cada uno de los capítulos anteriores.



Capítulo 1.

1. ANTECEDENTES.

La preocupación por evitar el uso inadecuado de los recursos energéticos, ha llevado a la sociedad a tomar nuevas alternativas, tales como el uso de instrumentos económicos (impuestos ambientales, bonos de carbono), políticas ambientales, el cambio al uso de energías alternas (eólica, solar, mareomotriz) como fuentes energéticas y estableciendo nuevos criterios de diseño en los nuevos desarrollos de viviendas, entre los cuales se encuentran el desarrollo de áreas verdes en áreas urbanas, el control de los flujos de aires y asimismo el de la radiación solar en las viviendas. [7] [8] [9]

Desafortunadamente, algunas de las estrategias que se han mencionado párrafo arriba, sólo se han establecido en países desarrollados, algunos de los cuales se han negado a participar, ya sea por la ignorancia de la situación o por el hecho de no percibir los riesgos a futuro, o peor aún, por contemplarlo fuera de sus alcances por la economía en la que se encuentran [8].



Cabe destacar, que el cambio climático y la acción del hombre están ligados estrechamente. De acuerdo al Panel Intergubernamental de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (IPCC), la temperatura media de la Tierra ha aumentado 0.74°C en 100 años [9]; y se prevé que continúe.

Por otro lado, Jacoby y D'Arrigo mostraron que los cambios de temperatura a nivel mundial han aumentado progresivamente de manera inusual [11]. Asimismo, se ha observado que la temperatura media anual en el hemisferio norte alcanzó los niveles más altos del siglo XX [12].

El cambio climático es de especial atención, ya que ha surgido como consecuencia del uso inadecuado de nuestros recursos energéticos y, por ende, antropogénico. Por ello, se debe dar una solución a tan grave problemática. Para lo cual, la única solución viable es reducir radicalmente las emisiones de CO_2 [10]. No obstante, la humanidad se ha vuelto tan dependiente de la energía, que se debe elegir entre el bien del planeta o la comodidad humana. Aunque siendo razonables, se debe encontrar un punto de equilibrio entre ambos.

De acuerdo con un Resumen de Cambio Climático publicado por la IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) en 2014, las emisiones antropógenas de GEI totales entre 2000 y 2010 fueron las más altas en la historia de la humanidad y llegaron a $49 (\pm 4.5) \text{ GtCO}_2\text{eq/año}$ (gigatoneladas de dióxido de carbono equivalentes por año) en 2010. De estas emisiones, el 6.4% pertenecen a los edificios, y si le atribuimos las emisiones derivadas de la producción eléctrica y térmica, aumentaría un 19%.

El comportamiento, el estilo de vida y la cultura tienen una considerable influencia en el uso de la energía y las emisiones asociadas, con gran potencial de mitigación en algunos sectores.



Una de estas medidas podría ser el uso de vidrios con filtro solar en zonas con alta irradiación solar, ya que los vidrios de sosa-cal contribuyen al aumento de la temperatura dentro de las edificaciones. Esto se debe a que a la elevada transmisión energética ($\cong 83\%$) de la energía radiante que incide sobre un vidrio incoloro de 6 mm de espesor, penetra al interior del edificio [13].

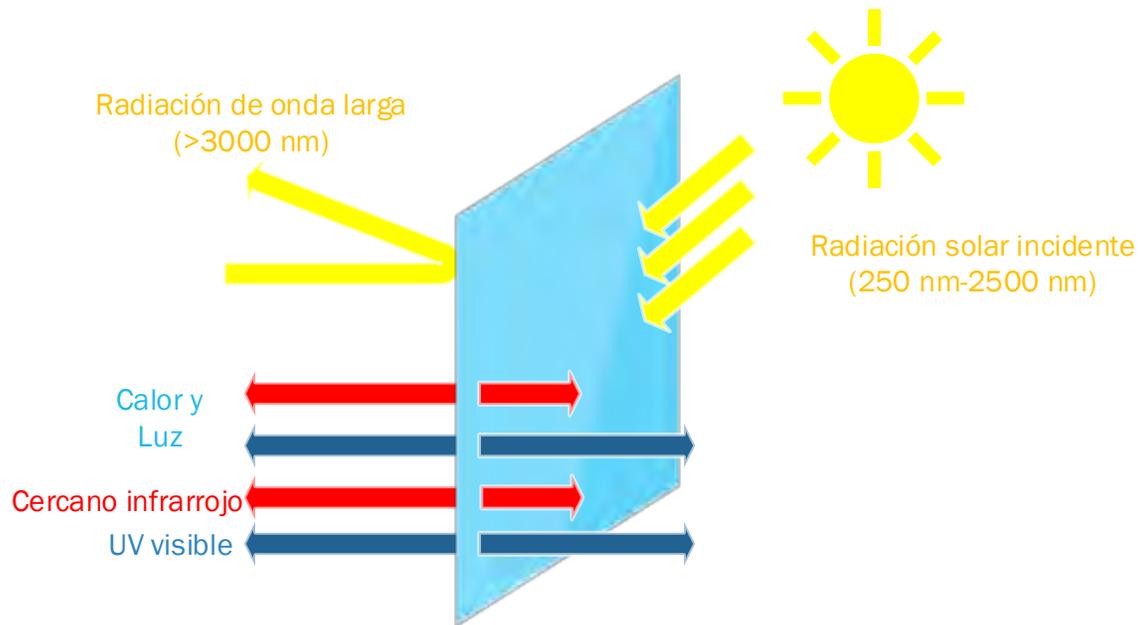


Figura 1.1 Ganancia térmica en vidrios.

Cuando la radiación solar incide sobre una ventana (Ver Figura 1.1), una parte de ésta se transmite al interior, otra se refleja al exterior y la parte restante la absorbe la masa del vidrio. La energía transmitida que llega al interior de la habitación ocasiona el calentamiento de los objetos dentro de ésta. Esto se debe, a que el vidrio de la ventana es transparente a la longitud de onda de la radiación solar incidente (250nm – 2500 nm). Por lo tanto, al calentarse la habitación y los objetos dentro de ésta por efectos de la radiación solar incidente, éstos emiten radiación de onda larga (>3000 nm) que no puede atravesar el vidrio, ya que éste es opaco a esas longitudes de



onda. La energía atrapada en la habitación ocasiona que la temperatura se eleve, originándose el fenómeno conocido como *efecto invernadero*. Por consecuencia se demanda más energía para enfriamiento del ambiente.

Los vidrios de sosa-cal usados en la mayoría de las ventanas presentan una transmisión de luz de 85 a 90% dependiendo de su espesor, ver Figura 1.1. Por tanto, si se requiere reducir la carga térmica al interior de habitaciones o vehículos, se sugiere el uso de vidrios aislantes (duovent) o atérmicos. Los vidrios duovent son unidades selladas constituidas por dos hojas de vidrio con un espacio de aire o algún gas inerte en el interior. Este tipo de vidrio es el mejor para reducir la carga térmica en edificaciones, pero su elevado costo lo hace prohibitivo para aplicaciones residenciales en México.

Por otra parte, entre los vidrios atérmicos se encuentran los absorbentes (entintados), reflejantes (película metálica depositada sobre una de sus caras) y para el control de la radiación solar o filtros solares. En éstos últimos se depositan químicamente películas semiconductoras para filtrar el paso de la radiación solar en sus diferentes regiones espectrales, reduciendo con esto la ganancia de calor al interior de edificaciones o automóviles.

Otro inconveniente en el uso de envidriados en las edificaciones, es la seguridad, ya que, en las zonas expuestas a fenómenos meteorológicos, es común la fractura o ruptura de los vidrios por causa de los fuertes vientos y proyectiles que son impulsados por el viento. Por este motivo mucha gente recurre al uso de madera para cubrir ventanas y así para evitar la ruptura de los vidrios. Se usa además cinta canela para que los fragmentos del vidrio no se conviertan en nuevos proyectiles impulsados por el viento, en caso del rompimiento de la ventana durante el fenómeno meteorológico.



Minor y Metha [14] realizaron una revisión de los diseños y prácticas para fabricar vidrios, con lo cual encontraron que las ráfagas de viento que golpean a un edificio, producen presiones que actúan tanto en el interior como en el exterior de los vidrios de las ventanas. En la actualidad podemos encontrar un vidrio laminado simple el cual se vende como un vidrio de seguridad, y está formado por un emparedado de 2 hojas de vidrio, usualmente de 3 mm de espesor cada una, unidas con PVB (Poly-Vinyl-Butiral) de 0.38 / 0.76 mm de espesor.

En 1999 Bher et al. [15] propusieron un criterio de diseño llamado "hoja de sacrificio", el cual consiste en que se rompa la hoja de vidrio exterior y no la interior, esto utilizando vidrios laminados simples. Lo anterior tiene como beneficio que el vidrio que permanece íntegro, es capaz de resistir las cargas de viento y proteger el interior de la edificación. Otro detalle fue obtener una adhesión adecuada entre los vidrios y el PVB, para evitar que los fragmentos del vidrio que se rompa se caigan quedando unidos al PVB.

A la fecha hay una gran variedad de estudios sobre el comportamiento mecánico de vidrios laminados [6] [14] [15] [16] [17], sin embargo, en todos estos estudios utilizan vidrio laminado fabricado con hojas de vidrio claro y PVB estándar (0.38 mm). Como se mencionó anteriormente, este tipo de vidrio tiene una transmitancia muy elevada (80-90 %). Por tanto, para reducir la carga térmica al interior de las edificaciones, es necesario utilizar vidrios de control solar, los cuales incorporan películas delgadas metálicas o semiconductoras. El efecto que tienen estas películas en la adhesión del vidrio laminado no se conoce, y en esta investigación se propone su estudio. Para poner en contexto la investigación realizada, a continuación, se presenta una breve descripción de los vidrios laminados y las películas de control solar desarrolladas.



1.1 VIDRIOS LAMINADOS DE CONTROL SOLAR.

Como se ha mencionado anteriormente, desde hace algunos años existen en el mercado los vidrios laminados, a los cuales de aquí en adelante se les llamarán vidrios laminados sencillos. Estos vidrios laminados sencillos tienen como principal característica, mejores propiedades mecánicas, como ser resistentes a impactos de proyectiles a baja velocidad (30-50 ms⁻¹) y a cargas de viento [18].

Por otra parte, los vidrios laminados de control solar tienen como objetivo adicional a las propiedades mecánicas, mejorar las condiciones de confort al interior de los edificios y automóviles en lugares con climas cálidos [19], esto gracias a las películas delgadas semiconductoras (PDS) que son incorporadas antes de laminar el vidrio. En algunos trabajos han encontrado que al emplear como sustrato una película de ZnS, se puede mejorar la adhesión de películas de CuS y Cu_{2-x}Se al vidrio [6]. Por tanto, es importante conocer el efecto que las PDS tienen en la adhesión de un vidrio laminado.

Un vidrio con características ideales sería aquel que tuviera una transmitancia óptica de 10-40% y una reflectancia óptica del > 10% en la región del visible, una transmitancia muy baja y la mayor reflectancia posible en la región del infrarrojo. Además, una baja emitancia térmica (< 0.15) de la superficie en contacto con el interior [19] [20].

Para la fabricación de este tipo de vidrios, se pueden utilizar diferentes sustratos para el depósito de las PDS, tales como son el vidrio, tereftalato de polietileno (PET), polimetil metacrilato (PMMA) y policarbonato (PC). Cada sustrato presenta características mecánicas diferentes, al igual que el crecimiento de las películas sobre cada uno es diferente [18]. Para el presente trabajo se utilizará el PET como sustrato para el depósito de las PDS.



1.2 PELÍCULAS DELGADAS SEMICONDUCTORAS (PDS) DE CONTROL SOLAR.

Las películas delgadas, al igual que las celdas fotovoltaicas, existen en forma monocristalina, policristalina y amorfa, esto gracias a la variedad de métodos para su obtención, como ya se ha hecho mención [21].

Las películas delgadas semiconductoras (PDS) tienen como función de actuar como un filtro solar y así contribuir al ahorro de energía eléctrica, al tratar de obtener las características ópticas ideales de transmitancia y reflectancia, en las regiones del ultravioleta (300-380 nm), visible (380-780 nm) e infrarrojo (780-2500 nm) (pendiente).

De acuerdo a lo mencionado anteriormente, el espesor y tipo de película a utilizar dependerá de las condiciones climáticas y ambientales particulares del lugar donde se pretenda utilizar los vidrios con PDS [19].

Las películas delgadas semiconductoras que se han obtenido a la fecha en trabajos de diferentes investigadores, son Cu_xS , Bi_2S_3 , PbS , ZnS-CuS , PbS-CuS , ZnS-NiS-CuS , entre otras [18]. Cada una de estas PDS puede presentar diferentes características ópticas dependiendo del sustrato sobre el cual se haga el depósito. Por ejemplo, de acuerdo con Hallin Hu las películas de Cu_xS , depositadas químicamente a 50°C , presentan mejores características ópticas depositadas en PMMA y PET que en vidrio [22].

1.3 MÉTODOS DE OBTENCIÓN DE PELÍCULAS DELGADAS SEMICONDUCTORAS Y SUBSTRATOS PARA EL DEPÓSITO DE LAS PDS.

Para la obtención de las películas delgadas semiconductoras existen dos tipos de métodos: los físicos y químicos. Entre los métodos físicos podemos encontrar Deposición de Láser Pulsado (PLD) [23], Evaporación por Vacío (PVD o CVD) [24] y



Bombardeo Catódico (Sputtering) [25], por citar algunos. Por otro lado, se encuentran los químicos, dentro de este apartado se encuentra el Depósito por Baño Químico (DBQ) [26] y Electrolytico [27], entre otros.

De los métodos químicos existentes para la obtención de PDS, el depósito por baño químico es uno de los más utilizados en la actualidad, debido a que resulta económico al no requerir de equipo costoso. Las películas delgadas semiconductoras obtenidas con este método presentan buena calidad dependiendo principalmente del tiempo de depósito y solución utilizada.

Para el depósito de las películas delgadas semiconductoras se utiliza como sustrato el vidrio, PET, PMMA y PC [18] [19] [20] [22], los cuales presentan características mecánicas diferentes, al igual que cada uno presenta mejores características con determinado método de depósito.

El PMMA y el PC presentan el inconveniente de desprendimiento de película durante el proceso de laminación. Para mejorar el depósito de la PDS se ha recurrido a diversos métodos de tratamientos superficiales a los sustratos, ya que esto ha ayudado a obtener una mejor adherencia en la unión película-sustrato [18]. Para este trabajo se utilizará el método de depósito por baño químico para depositar películas de sulfuro de cobre sobre hojas de tereftalato de polietileno, para lo cual no se hará ningún tratamiento al sustrato.

El depósito de baño químico utilizado para este trabajo es similar al utilizado por [18] al cual denominó "baño químico citrato". Aguilar realizó depósito de PDS de CuS sobre PET, la cual contenía iones de cobre (2) y una fuente de iones de sulfuro (Tioacetamida), colocando sustratos de 5 x 10 cm flotando sobre la solución.



1.4 PROPIEDADES MECÁNICAS DE VIDRIOS LAMINADOS.

Uno de los problemas con el uso de vidrios en los edificios es como se ven afectados por las cargas cíclicas de viento, pero Minor y Beason realizaron un estudio por medio del cual encontraron que una de las causas del rompimiento de los vidrios es la presión del viento y la otra es el impacto de proyectiles contenidos en el viento [28]. La adhesión del vidrio laminado juega un papel muy importante en las propiedades mecánicas. Si la adhesión o resistencia adhesiva es muy baja (< 5 MPa), el vidrio se puede desprender de la hoja de PVB durante un impacto, ocasionando heridas graves a las personas que se encuentran cerca del laminado. Por otra parte, si la adhesión es muy elevada (> 12 MPa), el vidrio se comportará como un panel rígido y existen probabilidades de que sea penetrado por los proyectiles que se impactan en éste. La adhesión óptima debe ser de $10 \text{ MPa} \pm 1 \text{ MPa}$, en donde el vidrio puede absorber gran parte de la energía cinética del proyectil, sin que se desprenda el vidrio del PVB.

Uno de los principales problemas que se presentan al depositar PDS sobre el vidrio, es la modificación de la adhesión del laminado, por tanto, es importante evaluar este parámetro mediante pruebas de resistencia adhesiva interfacial.

Uno de los primeros métodos para evaluar la resistencia adhesiva en vidrios laminados es el de Pummel, que consiste en golpear repetidas veces un vidrio laminado a 0°C sobre una superficie plana con un martillo de 300 g . Después de realizar la prueba se toma una tabla de referencia, una escala del 0 a 10 de acuerdo a los fragmentos de vidrio adheridos al PVB, para determinar si el vidrio pasa la prueba (deberá tener un valor mayor a 5). Este método de prueba es cualitativo y puede ser subjetivo, ya que depende fuertemente de la habilidad del operador que realiza la prueba.



El método utilizado por J. O. Aguilar es el de corte-compresivo, el cual sirve para cuantificar la influencia de las películas delgadas semiconductoras en la adhesión de los vidrios laminados, esto comparándolo con vidrio laminado sencillo y vidrio laminado con la siguiente configuración: vidrio-PVB-PET-PVB-vidrio [18].

La fuerza de adhesión entre la hoja de PVB y el vidrio debe ser $10 \text{ MPa} \pm 1 \text{ MPa}$, esto según las normas internas que se manejan en varias empresas fabricantes de automóviles [6].

Por último, es importante mencionar que la ubicación geográfica de Chetumal la hacen propensa al embate de huracanes o tormentas tropicales, los cuales causan considerables daños a materiales e inmuebles, principalmente en el área de ventanas. El contar con un vidrio que sea capaz de soportar vientos de hasta categoría 2 en la escala de Saffir-Simpson (hasta 125 km h^{-1}), es de gran importancia en la región. Actualmente no existe en el mercado nacional un producto que reúna las características de vidrio de seguridad y de control solar al mismo tiempo, en España ya se comercializa este tipo de vidrios



Capítulo 2.

Metodología para el desarrollo de los vidrios laminados

2.1 CONFIGURACIÓN DEL VIDRIO LAMINADO.

La configuración del vidrio laminado es de gran importancia, ya que de ésta dependen sus propiedades ópticas y mecánicas. Para el presente trabajo, se decidió utilizar como sustrato para el depósito de las películas delgadas semiconductoras (PDS), el tereftalato de polietileno (PET), ya que se reducen los riesgos de daño personal, en comparación con el vidrio debido al riesgo de rompimiento de éste.

Para la configuración de los vidrios se utilizó vidrio (V) de 3.2 mm de grosor, PET de 0.1 mm de grosor y PVB de 0.38 mm de grosor. La primera configuración está constituida por V/PVB/V (vidrio/PVB/vidrio), y de aquí en adelante se considerará como vidrio laminado de referencia. Otra configuración utilizada es la siguiente:



V/PVB/PET/PVB/V, al que a partir de aquí en adelante se llamará vidrio laminado con PET. El vidrio de referencia se puede encontrar fácilmente en el mercado local. Para las demás configuraciones se depositó una la película delgada semiconductor de sulfuro de cobre (CuS) sobre uno y ambos lados de las hojas de PET. El tiempo de crecimiento de las películas fue de 1 y 2 horas. Estas configuraciones se identificarán como: (i) V/PVB/CuS1h-PET/PVB/V; (ii) V/PVB/CuS1h-PET-CuS1h/PVB/V; (iii) V/PVB/CuS2h-PET/PVB/V y (iv) V/PVB/CuS2h-PET-CuS2h/PVB/V. Las configuraciones (iii) y (iv) tienen depositadas películas de CuS en ambas caras de la hoja de PET. En la Figura 2.1 se pueden observar los elementos que componen el vidrio laminado con PET.

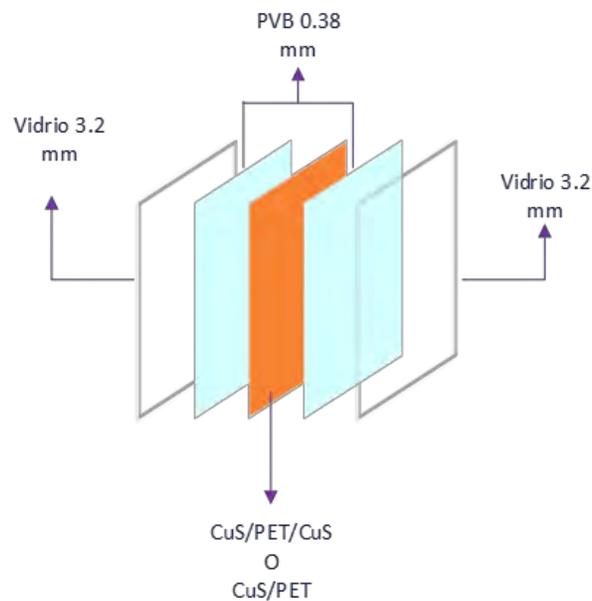


Figura 2.1. Configuración de los vidrios laminados con recubrimiento laminado de control solar.



2.1.1 TEREFALATO DE POLIETILENO (PET)

El tereftalato de polietileno (PET por sus siglas en inglés), es un polímero termoplástico lineal con un alto grado de cristalinidad [29]. Las propiedades físicas del PET y su capacidad para cumplir diversas especificaciones técnicas han sido las razones por las que el material haya alcanzado un desarrollo relevante en la producción de fibras textiles y en la producción de una gran diversidad de envases. En esta investigación se utiliza como sustrato para el depósito de películas delgadas semiconductoras de CuS.

Químicamente el PET es un polímero que se obtiene mediante una reacción de policondensación entre el ácido tereftálico y el etilenglicol. Pertenece al grupo de materiales sintéticos denominados poliésteres, y su estructura se puede ver en la figura 2.2.

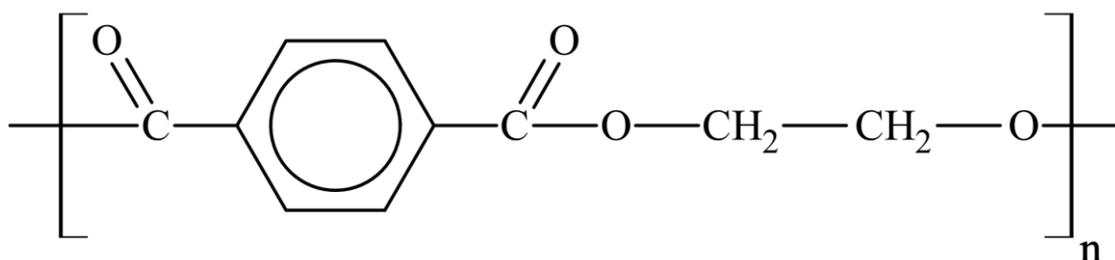


Figura 2.2. Estructura química del tereftalato de polietileno (PET).

2.1.2 POLIVINIL BUTIRAL (PVB)

El polivinil butiral es un compuesto químico de gran adherencia y durabilidad resultante de mezclar alcohol de polivinilo (PVA) con butiraldehído (esquema en la figura 2.3), y su uso principal es en la industria del vidrio. Este material fue



desarrollado por la empresa DuPont en 1938 y ha jugado un papel determinante en el desarrollo de la industria del vidrio.

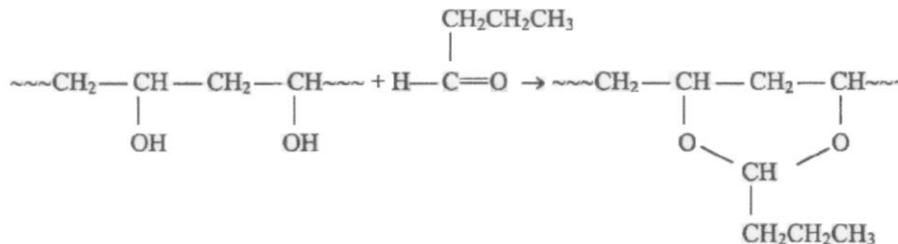


Figura 2.3. Estructura química del polibinil butiral (PVB).

La humedad en la hoja de PVB es muy importante, ya que influye directamente en la adhesión de la misma al vidrio. Si la humedad es alta la adhesión entre PVB y vidrio disminuye. El contenido de humedad de los fabricantes de PVB no debe de exceder del 0.50% (*w/w*), y se debe de almacenar en un ambiente con humedad relativa controlada de 25 a 30% [18]. El PVB es ampliamente utilizado para la fabricación de los parabrisas de automóviles, dado que tiene la capacidad de absorber impactos y distribuirlos en toda su masa, evitando así daños a los pasajeros o peatones que se impactan en éste, durante un choque o atropellamiento. En la industria de la construcción, el vidrio laminado se utiliza como vidrio de seguridad ante actos vandálicos y fenómenos meteorológicos como tormentas tropicales y huracanes. Es importante mencionar que la adhesión en el vidrio varía en función de la aplicación. En edificaciones, el vidrio debe tener una adhesión mayor que un parabrisas, para proporcionar resistencia mecánica ante impactos de proyectiles contenidos en el viento o golpes de actos vandálicos.

La adhesión entre el vidrio y el PVB está ampliamente estudiada y se da principalmente por los enlaces OH que forma el PVB con la superficie del vidrio. Sin embargo, las propiedades adhesivas del PVB se modifican por los minerales



presentes en el agua (dureza), lo cual forma depósitos en la superficie del vidrio si éste no se ha lavado adecuadamente con jabón y agua desionizada.

En las figuras 2.4 y 2.5 se muestra la variación del contenido de humedad del PVB respecto a la humedad relativa del aire y la relación del contenido de humedad del PVB respecto al esfuerzo cortante máximo, razón por la cual el proceso de laminado se tiene que hacer en un ambiente con temperatura y humedad controladas.

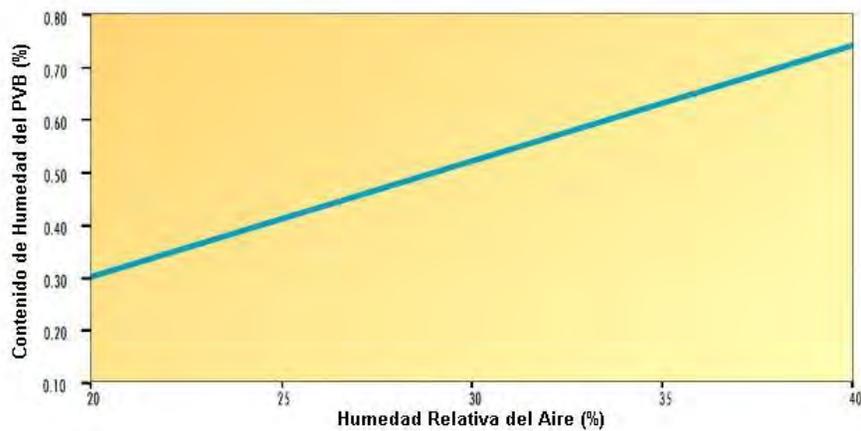


Figura 2.4 Variación del contenido de humedad del PVB respecto a la humedad relativa del aire [30]

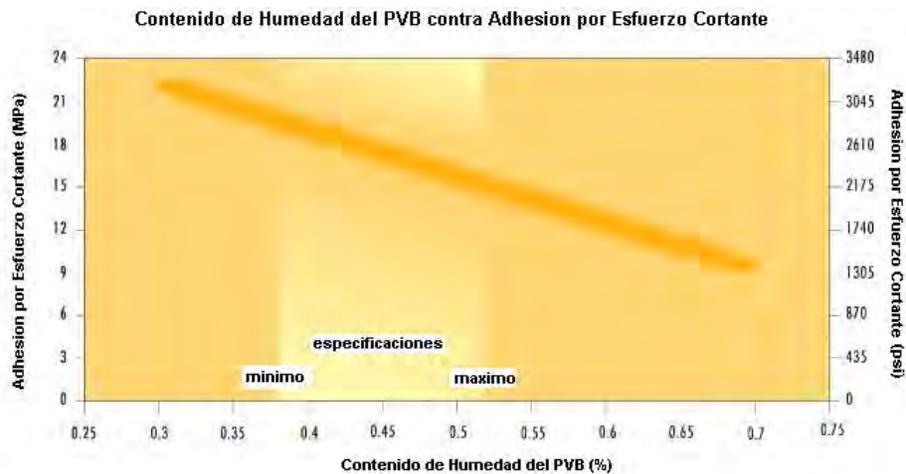


Figura 2.5. Relación del contenido de humedad del PVB respecto al esfuerzo cortante máximo [30].



De la figura 2.5 se observa que un elevado contenido de humedad en el PVB ocasiona una reducción de la resistencia adhesiva interfacial o adhesión por esfuerzo cortante en el vidrio laminado. En la figura se indica que el contenido de humedad mínimo es de 37.5% (18 MPa) y el contenido máximo de 52% (15 MPa).

Es importante mencionar que los valores de adhesión mostrados previamente son para un vidrio laminado de tres capas, vidrio/PVB/vidrio y en este trabajo de investigación se incluyen dos capas más con un material que no se tiene estudiado (PET), de aquí la importancia de este trabajo.

2.2 DEPÓSITO DE BAÑO QUÍMICO (DBQ) DE LAS PDS DE CuS SOBRE HOJAS DE PET.

El DBQ es una técnica para depositar películas delgadas en materiales a presión atmosférica y baja temperatura. Con este método es posible fabricar películas delgadas de grandes áreas a bajo costo, y consiste básicamente de una serie de reacciones químicas que se llevan a cabo sobre un sustrato sólido sumergido en la mezcla de reacción. Además, no se requieren equipos especiales ni energía adicional (eléctrica) para la obtención de las películas.

En este trabajo se utilizó el CuS como filtro solar y hojas de Tereftalato de polietileno (PET) como sustrato, para lo cual se utilizó el método de depósito por baño químico (DBQ). El depósito de las PDS de CuS se llevó a cabo en el Instituto de Energías Renovables (antes Centro de Investigación en Energía) de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).

Para la obtención de estas películas se utilizó una solución proporcional a la reportada por Aguilar [18], el cual se describe en la tabla 2.1. Para esto se utilizaron los siguientes reactivos: citrato de sodio ($\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7$) en concentración de 1 mol,



cloruro cúprico (CuCl_2) en concentración de 1 mol, Tioacetamida (TA) en concentración de 1 mol y agua destilada (H_2O) a una temperatura de 50°C .

Tabla 2.1 Solución de 5333.32 ml para DBQ.

Soluciones		Volumen (ml)
CuCl_2	1M	10
$\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7$	1M	45
TA	1M	10
Agua destilada (50°C)		935
Total		1000

Para iniciar un depósito es necesario preparar la solución, para lo cual, se requiere calentar agua destilada hasta que alcance una temperatura de 50°C , para después preparar la solución de depósito de baño químico con los reactivos, y posteriormente verterla en la charola de plástico. Como segundo paso, se colocan hojas de PET sobre la superficie de la solución de CuS . Debido a la diferencia de densidades, la hoja de PET flota en la solución y el proceso de depósito de la película delgada se lleva a cabo por crecimiento ion a ion en la superficie del PET que está en contacto con la solución. Al finalizar el tiempo de depósito, se enjuaga y se seca la hoja de PET que contiene la película delgada depositada. Si se requiere depositar en ambos lados de la hoja de PET, se repite el procedimiento girando 180° la hoja de PET.

Las películas de CuS depositadas sobre la hoja de PET, son una familia de compuestos químicos y minerales con la fórmula Cu_xS_y . El interés en las películas delgadas de CuS se centraba en el desarrollo de celdas solares, pero se ha demostrado el interés



para su aplicación en vidrio arquitectónicos gracias a sus características ópticas [16] [18].

El depósito de películas delgadas semiconductoras de CuS por DBQ, se ha realizado con anterioridad en otros trabajos de investigación [6] [16] [18] [21], en los cuales se utilizado como sustrato vidrio o tereftalato de polietileno.

Uno de los inconvenientes que presenta el depósito de PDS de sulfuro de cobre sobre PET, es la degradación de la película cuando es expuesta al ambiente [21]. Por esto es importante almacenar las hojas de PET con película de CuS en bolsas plásticas con sílica.

2.3 PROCESO DE LAMINACIÓN DE VIDRIOS.

El proceso de laminación que se utilizó para este trabajo se divide en dos partes: pre-laminación y laminación. El proceso de pre-laminación de un vidrio se utiliza para extraer la mayor cantidad de aire atrapado entre los elementos que lo componen, además de iniciar una pre-adhesión del PVB con el vidrio y la hoja de PET. El proceso de laminación se lleva a cabo inmediatamente después de finalizado el pre-laminado y consiste en aplicar presión y calor al laminado durante un tiempo específico, para lograr la máxima adherencia entre todos los elementos. A continuación, se describe a detalle cada uno de estos procesos.

2.3.1 PRE-LAMINACIÓN POR RODILLOS.

La pre-laminación por rodillos, consiste en hacer pasar el laminado (emparedado) a través de 2 pares de rodillos a una velocidad de 6 cm/min, los cuales le aplican al vidrio una presión de 1 kg/cm². Estos rodillos están colocados a la entrada y salida



de un horno (Figura 2.6), el cual trabaja a una temperatura de 200°C. Dicho proceso, se utiliza para sellar los bordes del laminado, extrayendo parcialmente el aire del interior. La Figura 2.7 muestra las dos configuraciones de vidrios laminados con PET utilizadas en esta investigación.

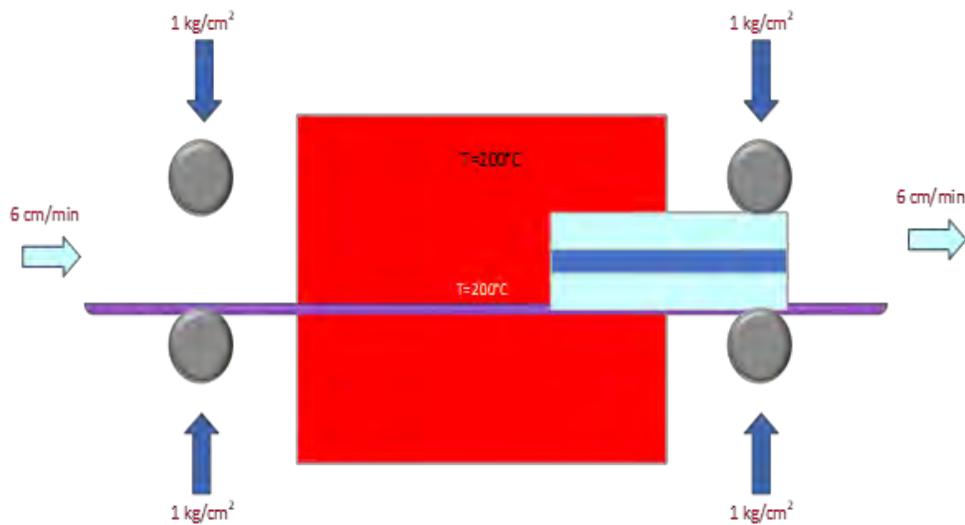


Figura 2.6 Proceso de Pre-laminación por rodillos.

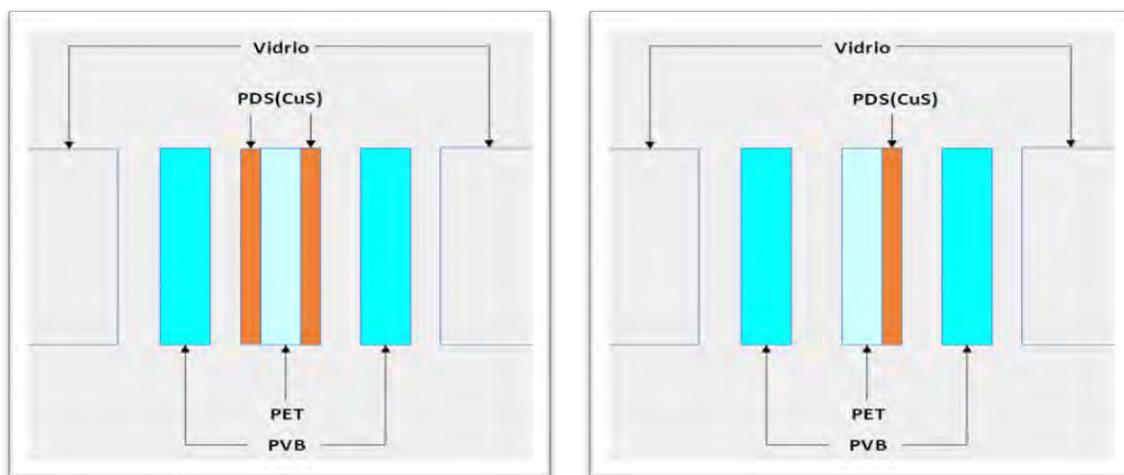


Figura 2.7 Emparedados de vidrios laminados con depósito de PDS en uno y ambos lados.



2.3.2 PROCESO DE LAMINACIÓN.

La laminación, consiste en introducir los vidrios en una autoclave que opera a 12.7 kg/cm² y 135°C durante un tiempo de 3 horas. Este proceso consta de tres etapas:

1. Levantamiento de presión y temperatura, hasta alcanzar las condiciones de operación; Es importante mencionar que primero se presuriza el autoclave hasta alcanzar 8 kg/cm² y posteriormente se aplica calor hasta alcanzar 100°C, a partir de este punto se ajustan ambos valores hasta llegar a 12.7 kg/cm² y 130°C en un periodo de 30 min.
2. Sostenido, tiempo durante el cual el laminado es sometido a las condiciones de laminación, usualmente son dos horas
3. Enfriamiento y despresurización, en esta etapa es muy importante enfriar el autoclave hasta que alcance una temperatura de 50-50°C y posteriormente se inicia con la despresurización. No seguir este procedimiento ocasionará que haya inclusión de burbujas de aire en el laminado que no cumpla con los estándares de calidad.

2.4 PRUEBAS MECÁNICAS.

El método utilizado para evaluar la resistencia adhesiva interfacial en vidrios laminados es el reportador por Jagota y colaboradores [17], el cual se describió en el capítulo 1. Dicho método de prueba se conoce como de corte-compresión, en donde una fuerza cortante promueve la nucleación de la fractura en la interface vidrio /PVB, bajo condiciones controladas de carga. Una vez que la adhesión llega a



su nivel más bajo, la fractura se propaga inestablemente hasta que ocurre la falla y, en consecuencia, una caída súbita de la carga aplicada. A continuación, se presentan los detalles del método de prueba utilizado.

2.4.1 PRUEBAS DE ADHESIÓN.

El dispositivo utilizado en las pruebas de adhesión se muestra en la Figura 2.8. A este dispositivo se le aplica una carga vertical controlada por un dispositivo para pruebas de compresión marca Mecmesin. Debido a la geometría que tiene el dispositivo (45° de inclinación), la fuerza vertical se descompone en una fuerza de compresión y otra de corte (cizalladura). La fuerza de compresión no tiene una fuerza equilibrante, debido a que los soportes del dispositivo son rodamientos axiales, por tanto, toda la carga aplicada es de cizalladura. Conocida la magnitud de la fuerza (N) a la que fallan las probetas de vidrio laminado y además conociendo el área de la probeta (mm^2), se obtiene el esfuerzo cortante máximo (MPa) al que ocurre la falla, siendo este valor utilizado para caracterizar la adhesión en los vidrios laminados.



Figura 2.8. Dispositivo para pruebas de adhesión [18].



La geometría de la probeta fue circular y una vez cortada, con broca de diamante, se mantuvo a una temperatura de 18°C y 50-55% de HR antes de iniciar la prueba. En la industria automotriz el valor de referencia para caracterizar la adhesión en parabrisas es de 10 ± 1 MPa.

2.5 Conclusiones

En este capítulo se presentó de forma sucinta la metodología para obtener los recubrimientos de control, los laminados de vidrios y las pruebas de resistencia adhesiva interfacial en vidrios laminados de control solar. En el siguiente capítulo se presentará el desarrollo de las pruebas de resistencia adhesiva interfacial en los laminados y los resultados obtenidos.



Capítulo 3.

Desarrollo experimental

3.1 DEPOSITO DE PDS DE CuS SOBRE PET.

Como se mencionó en el apartado 2.1 la configuración del vidrio laminado es importante, ya que de eso dependen sus propiedades ópticas y mecánicas. Para llevar a cabo los depósitos primero se tomó en cuenta las configuraciones de vidrios a desarrollar. Estas configuraciones se describen a continuación: V/PVB/CuS1h-PET/PVB/V, V/PVB/CuS1h-PET-CuS1h/PVB/V, V/PVB/CuS2h-PET/PVB/V y V/PVB/CuS2h-PET-CuS2h/PVB/V.

Dado que las propiedades ópticas de las Películas Delgadas Semiconductoras (PDS) están en función de su espesor, se utilizaron dos espesores diferentes, depósitos de películas en una y ambas caras de la hoja de PET. También se utilizarán dos vidrios



más, los arreglos de vidrios mencionados en el apartado 2.1, V/PVB/V (vidrio laminado de referencia) y V/PVB/PET/PVB/V (vidrio laminado con PET). Todos los arreglos de vidrios laminados usados para este trabajo fueron de 30x30 *cm*.

Como se mencionó antes en el apartado 2.2, el depósito de las películas delgadas semiconductoras de CuS se llevó a cabo en el Instituto de Energías Renovables (antes Centro de Investigación en Energía) de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Para esto se utilizó el método de Deposito de Baño Química (DBQ) descrito en este mismo apartado (2.2), que fue el utilizado por Aguilar [18] en su tesis doctoral. Para el DBQ se utilizó como sustrato el PET, en hojas de 125x90 *cm* como se muestra en la figura 3.1.



Figura 3.1 Deposito de baño químico realizado en el Instituto de Energías Renovables (antes Centro de Investigación en Energía) de la UNAM.

3.1.1 HOJA DE PET CON PDS DE CuS DEPOSITADA POR 1 HORA EN UN LADO.

Para el desarrollo de esta película se utilizó la solución que se muestra en la Tabla 3.1, La duración del depósito químico fue durante una hora y se depositó en una



cara de la hoja de PET. Al finalizar el depósito se enjuaga la hoja de PET con agua destilada a temperatura ambiente del lado de la película, y se seca con aire tibio con la ayuda de la secadora de cabello.

Tabla 3.1 Solución de 6000 ml para DBQ.

Soluciones		Volumen (ml)
CuCl₂	1M	60
Na₃C₆H₅O₇	1M	270
TA	1M	60
Agua destilada (50°C)		5610
Total		6000

Una vez secas las hojas de PET/PDS, se debe almacenar en bolsas herméticas y sílica para evitar que se degraden. Este empaquetado tiene una duración de 15 días aproximadamente, después de este tiempo, las películas inician su proceso de degradación, al saturarse la sílica contenida en las bolsas que contienen las PDS [31].

3.1.2 HOJA DE PET CON PDS DE CuS DEPOSITADA POR 1 HORA EN AMBOS LADOS.

Se realizó un segundo depósito de película delgada de CuS sobre una hoja de PET con una duración de una hora, utilizando la composición que se muestra en la Tabla 2.2. De hecho, la formulación es la misma, sólo que se tiene que ajustar de acuerdo a la cantidad de solución que se utilizará en el baño químico. Al finalizar el segundo depósito se procedía al enjuague y secado de la hoja, para después realizar un tercer depósito sobre el lado sin PDS de la misma hoja, utilizando la misma composición mencionada anteriormente (tabla 3.2) y por el mismo periodo de tiempo, 1 hora.



Tabla 3.2 Solución de 5333.32 ml para DBQ.

Soluciones		Volumen (ml)
CuCl₂	1M	53.33
Na₃C₆H₅O₇	1M	240
TA	1M	53.33
Agua destilada (50°C)		4986.66
Total		5333.32

3.1.3 HOJA DE PET CON PDS DE CuS DEPOSITADA POR 2 HORAS EN UN LADO.

Como se observa, los depósitos químicos de las PDS son similares, solo debe tenerse control del número de PDS que se depositarán en las hojas de PET, con el objetivo de aumentar el espesor de la película final y por tanto mejorar las propiedades ópticas de control de la radiación solar. En este caso, se hicieron dos depósitos de 2h cada uno en ambos extremos de la hoja de PET. De igual forma, las hojas con PDS se almacenaron en bolsas herméticas para ser enviadas a laminar.

3.1.4 HOJA DE PET CON PDS DE CuS DEPOSITADA POR 2 HORAS EN AMBOS LADOS.

Se repite la misma operación que en los apartados anteriores, sólo que ahora se hace un depósito químico de 2h en cada lado de la hoja de PET. Es importante mencionar que primero deposita la PDS en un extremo y después en el otro, cuidando que las condiciones del depósito químico sean similares, de lo contrario el espesor (color) de la PDS puede tener ligeras variaciones y por tanto diferentes propiedades ópticas.



En la Tabla 3.3 se presentan las películas obtenidas en función del número de PDS depositadas en las hojas de PET.

Tabla 3.3 Películas delgadas semiconductoras depositadas en las hojas de PET.

Descripción	Lado 1	Lado 2
CuS1h-PET	CuS 1h	
CuS1h-PET-CuS1h	CuS 1h	CuS 1h
CuS2h-PET	CuS 2h	
CuS2h-PET-CuS2h	CuS 2h	CuS 2h

3.2 CARACTERIZACIÓN ÓPTICA DE PELÍCULAS DE CONTROL SOLAR.

Para caracterizar las propiedades ópticas, transmitancia (τ) y reflectancia (ρ), de los vidrios laminados de control solar, se utilizó un espectrofotómetro Shimadzu 3100 PC. Para la medición de la transmitancia óptica se utilizó el aire como referencia y para la reflectancia especular a incidencia casi normal (5°) se utilizó un espejo de primera superficie como referencia. Con las mediciones anteriores se obtuvieron los parámetros de control solar integrados (R% y T%) en las tres regiones de interés del espectro de radiación solar, ultravioleta (300-380 nm), visible (380-780 nm) y cercano infrarrojo (780-2500 nm). La caracterización óptica se realizó de acuerdo a la norma internacional ISO 9050-2003 [32].

3.3 PRE-LAMINACIÓN Y LAMINACIÓN DE LOS VIDRIOS

Una vez obtenidas las PDS depositadas en las hojas de PET, se tienen que integrar en un vidrio laminado. El proceso de laminación se realizó en la empresa VITRAULD



S.A de C.V. a quienes se les enviaron las hojas de PET con PDS para su laminación. Antes de ser enviadas, las hojas de PET se cortaron en tamaños de 55 cm x 55 cm y 35 x 35 cm, para obtener emparedados de 50 cm x 50 cm y de 30 cm x 30 cm. En la Figura 3.1 se observa la distribución de las hojas de PET usadas para la fabricación de los vidrios laminados.

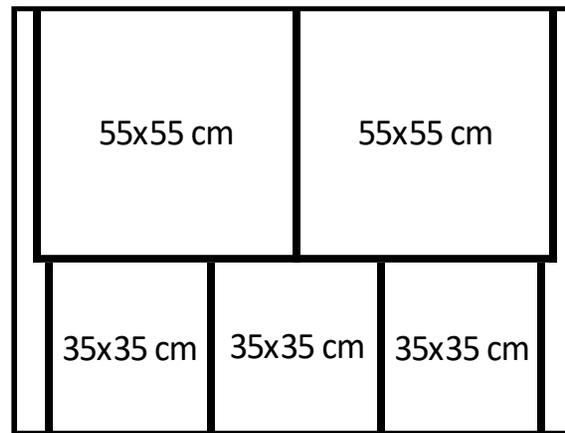


Figura 3.2 Esquema de corte de las hojas de PET con PDS de CuS.

El proceso de pre-laminación utilizado por VITRAULD consiste en colocar unos arillos de silicon en los extremos del laminado (perímetro), los cuales están conectados a una bomba de vacío. Posteriormente, se coloca el vidrio en una autoclave y se lleva a cabo el proceso de pre-laminación y laminación de forma simultánea. Las condiciones del proceso de laminación se presentaron en el capítulo anterior (apartado 2.3).

3.4 CARACTERIZACIÓN DEL SISTEMA PARA PRUEBAS DE RESISTENCIA ADHESIVA

Como se mencionó en el apartado 2.4.1, el método utilizado para este trabajo fue muy similar al utilizado por Aguilar [18] en su tesis doctoral, solo cambió la geometría



de la probeta, de forma cuadrada a circular (en este trabajo). Las muestras de vidrio laminado se cortaron de las probetas mostradas en la Fig. 3.1. Es importante mencionar que se depositaron 4 hojas similares a la mostrada en la Fig. 3.1, pero con las configuraciones mostradas en la Tabla 3.1. Las condiciones del baño químico para obtener las PDS se presentaron en el apartado 2.2 del capítulo 2.

Las probetas de 35 cm x 35 cm se seccionaron en 16 partes, como se puede observar en la Figura 3.2, de cada una de estas secciones se obtuvo una muestra de vidrio laminados, que se cortó con una broca de diamante de 30 mm de radio. En las siguientes secciones se explica a detalle la forma en que se obtuvieron las muestras y la forma en que se almacenaron antes de realizar las pruebas de resistencia adhesiva.

El procedimiento para realizar las pruebas de resistencia adhesiva es el siguiente: i) seleccionar las áreas del vidrio para obtener las probetas; ii) cortar las probetas seleccionadas; iii) refrigerar las probetas; iv) preparar la máquina para las pruebas, y v) realizar las pruebas de cizalladura.

3.4.1 PREPARACIÓN DE MUESTRAS.

Como se mencionó anteriormente, se obtuvieron 16 muestras circulares de cada probeta elaborada, ver Figura 3.2. Todas y cada una de éstas se utilizaron para las pruebas de resistencia adhesiva, excepto las que se delaminaron durante el corte, que se indican en la misma figura. Se utilizó un taladro con broca de diamante de 30 mm de diámetro para cortar las muestras de vidrio laminado, las cuales tuvieron un diámetro de 28 mm debido a las pérdidas por el espesor de la broca. El proceso de corte se debe hacer a bajas revoluciones (100 *rpm*), lubricando con una solución de



agua (90%)-diesel (10%), como se ve en la Figura 3.3. La fuerza aplicada a la broca debe ser uniforme, de lo contrario se corre el riesgo de delaminar la probeta.

Una vez cortadas las 16 muestras de cada probeta (16 muestras x 5 probetas = 80 muestras en total), se acondicionaron hasta alcanzar una temperatura de 18°C con una HR del 50-55%.

El objetivo de utilizar las 16 muestras es evaluar la distribución de la resistencia adhesiva en la muestra, que debe tener valores mayores en el centro de la probeta y menores en los extremos. Este resultado se reportó previamente por Aguilar y colaboradores [16] y se debe a que la extracción del aire durante el proceso de pre-laminación y laminación, elimina el aire del laminado desde la parte central hacia los extremos. De aquí que las zonas con menor cantidad de aire es la parte central, en donde se tienen los valores mayores de adhesión.

a_{11}	a_{12}	a_{13}	a_{14}
a_{21}	a_{22}	a_{23}	a_{24}
a_{31}	a_{32}	a_{33}	a_{34}
a_{41}	a_{42}	a_{43}	a_{44}

Figura 3.3 Esquema del corte de vidrio de 30x30 cm y las 16 zonas seleccionadas para las pruebas de resistencia adhesiva.



Figura 3.4 Corte de vidrios con taladro con broca de punta de diamante de 30 mm de diámetro.

Para hacer más eficiente el corte fue necesario cortar primero un vidrio del laminado hasta llegar al PVB, posteriormente se hace un corte concéntrico en el otro extremo del laminado hasta llegar al PVB. Por último, con una hoja de bisturí se corta el PVB remanente, y es separada la probeta del laminado. La Figura 3.4 muestra unas imágenes de las probetas obtenidas.

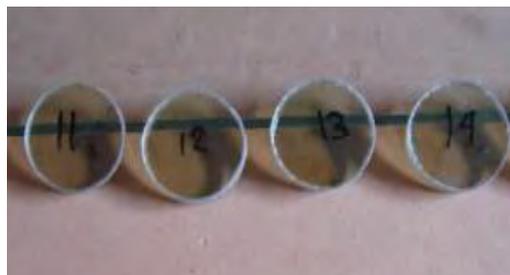


Figura 3.5 Probetas de vidrio laminado de control solar obtenidas para las pruebas de resistencia adhesiva interfacial.



Después de obtener las probetas de los vidrios, estas se clasificaron de acuerdo a su posición del vidrio, tiempo y lados con depósito (ver Figura 3.5); para lo cual se usó cinta adhesiva y marcador permanente. Cada grupo de 16 probetas (por vidrio) fueron guardadas en bolsas herméticas junto con arroz (el arroz se utilizó para que absorba humedad almacenada en la bolsa), ya que estas probetas fueron refrigeradas antes de llevar a cabo las pruebas de resistencia adhesiva, como lo indican las normas automotrices para pruebas de resistencia adhesiva de parabrisas.



Figura 3.6 Clasificación de probetas obtenidas para las pruebas de resistencia adhesiva

En la Tabla 3.4 se muestra el formato utilizado para evaluar la resistencia adhesiva en cada muestra obtenida. Los espacios en blanco serán llenados al momento de registrar la carga máxima soportada por la probeta y posteriormente calcular el valor de la resistencia adhesiva interfacial máxima.



Tabla 3.4 Formato para registrar la resistencia adhesiva interfacial en vidrios laminados de control solar.

No. Muestra	Área (mm ²)	Fza. Máxima (N)	Resist. Adhesiva (MPa)
1	615.75	1579.8513	2.5657
2	615.75	1475.99889	2.3970
3	615.75	1475.99889	2.3970
4	615.75	1646.6346	2.6741
5	615.75	1509.43957	2.4513
6	615.75	1631.8266	2.6501
7	615.75	1375.873	2.2344
8	615.75	1542.78218	2.5055
9	615.75	1464.91738	2.3790
10	615.75	1424.12171	2.3128
11	615.75	1450.10934	2.3550
12	615.75	1301.73472	2.1140
13	615.75	1561.31675	2.5356
14	615.75	1692.15679	2.7481
15	615.75	1390.7791	2.2586
16	615.75	1490.905	2.4212

3.4.2 PRUEBAS DE RESISTENCIA ADHESIVA.

Las pruebas de resistencia adhesiva se llevaron a cabo en una máquina universal, marca Mecmesin. El método de prueba utilizado se denomina *cizalladura* o *esfuerzos cortantes-compresivos*, el cual se describió en el apartado 2.4.2.



Para las pruebas de resistencia adhesiva interfacial se preparó primero la máquina, para lo cual se realizaron pruebas preliminares con vidrio laminado de referencia (V/PVB/V) para estar seguros que la maquina cumpla con la función requerida para este trabajo.

Las pruebas se realizaron en el siguiente orden: vidrio laminado de referencia, vidrio laminado con PET (V/PVB/PET/PVB/V), V/PVB/CuS-1h/PET/PVB/V, V/PVB/CuS-1h/PET/CuS-1h/PVB/V, V/PVB/CuS-2h/PET/PVB/V y por último V/PVB/CuS-2h/PET/CuS-2h/PVB/V.

Durante las pruebas de resistencia adhesiva, se registraron los valores obtenidos en el formato mostrado en la Tabla 3.4 y posteriormente se pasaron a una hoja de cálculo, en dónde se obtuvieron los valores finales y se elaboraron las gráficas de distribución de resistencia adhesiva de cada probeta. Los resultados obtenidos de describen en el capítulo 4.

3.5 Conclusiones

En este capítulo se describe del desarrollo experimental realizado para obtener la resistencia adhesiva interfacial de vidrios laminados de control solar. Se presentó desde el depósito por baño químico, el pre-laminado y laminado de los vidrios, así como el procedimiento para el corte de las muestras y su preparación para las pruebas de resistencia adhesiva interfacial. En el siguiente capítulo se presentan los resultados obtenidos al desarrollar las pruebas mencionadas en este capítulo.



Capítulo 4.

Resultados y Análisis de Resultados

4.1 Descripción de los experimentos.

En los capítulos previos se explicó a detalle la metodología a seguir, tanto para la elaboración de los vidrios laminados de control solar, así como de las pruebas experimentales para evaluar la resistencia adhesiva interfacial de los mismos. Se mencionó también que se fabricaron cuatro tipos de vidrios laminados de control solar, con diferentes tipos de control solar. Sin embargo, es necesario tener una referencia, que en este caso fue un vidrio laminado transparente, es decir, sin películas de control solar. La configuración de este vidrio es la siguiente: v/PVB/PET/PVB/V, es decir, una hoja de PET unida al vidrio claro de 3 mm mediante dos hojas de PVB. En la Tabla 4.1 se muestran los tipos de vidrio que se utilizaron en esta investigación.

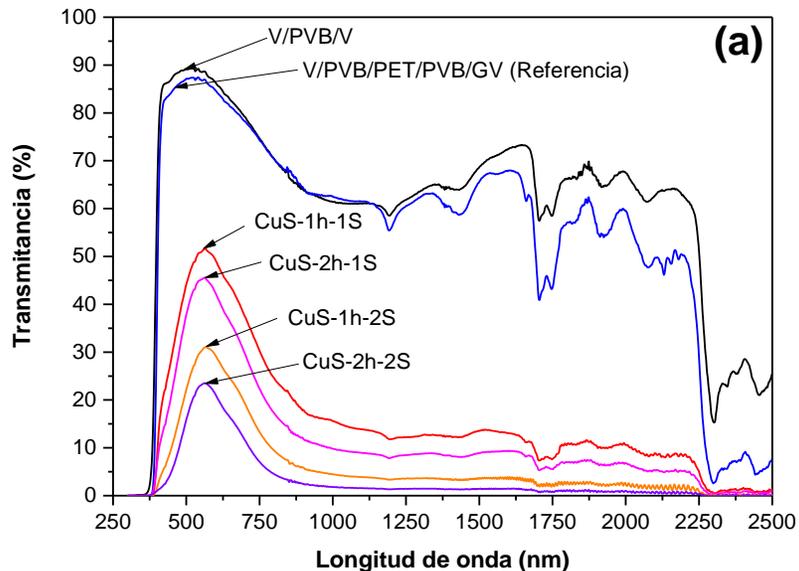


Tabla 4.1. Configuraciones de vidrios laminados de control solar evaluados a resistencia adhesiva interfacial.

Descripción	Nomenclatura en gráficos
V/PVB/PET/PVB/V	Referencia
V/PVB/PET-CuS-1h/PVB/V	CuS-1h-1s
V/PVB/CuS-1h/PET/CuS-1h/PVB/V	CuS-1h-12s
V/PVB/PET-CuS-12h/PVB/V	CuS-12h-1s
V/PVB/CuS-2h/PET/CuS-2h/PVB/V	CuS-2h-12s

4.2 Propiedades ópticas de vidrios laminados de control solar

En las Figuras 4.1 a y b, se observan las curvas de transmitancia óptica y reflectancia especular, respectivamente, de los vidrios laminados de control solar estudiados en este trabajo.



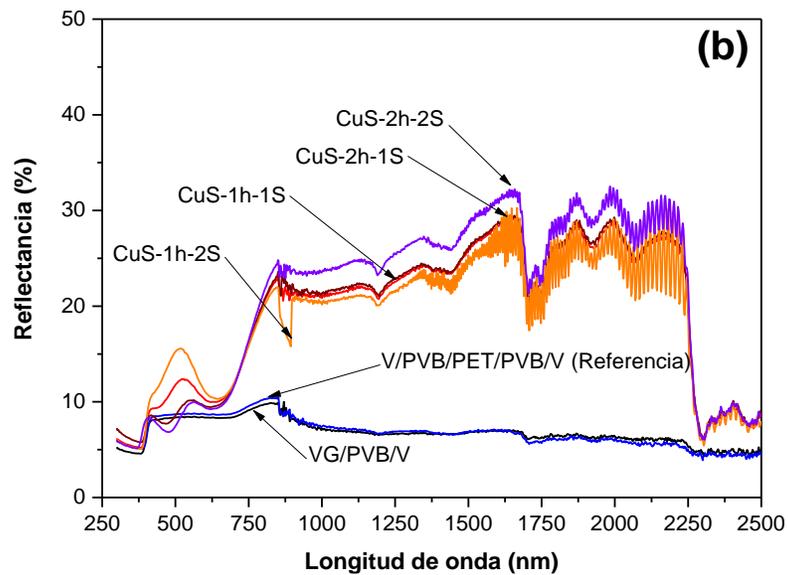


Figura 4.1. a) Transmitancia óptica y b) Reflectancia especular de películas de control solar de CuS depositadas sobre hojas de PET en uno y ambos lados por 1h y 2 h.

Aunque no se realizaron pruebas a vidrios laminados simples, es decir, dos hojas de vidrio unidas con una hoja de PVB de 0.76 mm, se muestra como una referencia adicional en las Figuras 4.1 (a) y (b). Lo anterior tiene como objetivo mostrar las diferencias mínimas en transmitancia y reflectancia entre un vidrio laminado simple y uno transparente con dos hojas de PET y dos hojas de PVB.

Se puede observar de la Figura 4.1 todas las curvas de transmitancia de vidrios de control solar presentan su valor máximo en la región visible del espectro electromagnético. También, se observa que los valores menores están localizados en las regiones ultravioleta (UV) y cercano infrarrojo (NIR). Es importante mencionar que la longitud de onda en la que la transmitancia es máxima, corresponde a la máxima sensibilidad del ojo humano, por lo que al instalar este tipo de vidrio en ventanas de habitaciones se tendrá iluminación natural, evitando o reduciendo el uso de luz artificial durante el día. Además, se reduce la carga térmica al interior de los recintos hasta un 50% respecto a un vidrio claro de 3 mm de espesor.



La transmitancia en la región visible es de 32.4% y 17% para vidrios laminados con 1h y 2h de depósito en ambas caras de la hoja de PET, lo cual está en el rango de los valores comerciales de películas de control solar disponibles en el mercado nacional. La mayor ventaja que presentan las películas de CuS es que la reflectancia en la región visible tiene un rango de 8-10%, lo cual elimina los molestos deslumbramientos a edificaciones vecinas y, además, es menor al 30% que tienen la mayoría de los recubrimientos de control solar comerciales fabricados con otras técnicas de depósito químico. Es importante observar de la Figura 4.1 que la transmitancia de los vidrios con película de CuS depositada en ambos lados de la hoja de PET por 1h, es más baja que las depositadas en un solo lado de la hoja de PET, durante 2 h. Este comportamiento se debe a la diferencia de espesores de la película, que va de 70 (1h) hasta 110 nm (2h). Es decir, dos películas de CuS depositadas durante 1h alcanzan un espesor (d_f) de 140 nm y una película depositada sobre PET durante 2 h alcanza un espesor de 110 nm. La cinética del crecimiento de la PDS no es lineal. En el caso de la película de 2h, ésta crece en el baño químico siguiendo la siguiente relación:

$$d_f(t) = d_f(max)[1 - \exp(t - t_0)/\tau] \quad (4.1)$$

Donde $d_f(max)$ es el espesor máximo que se puede obtener en un tiempo (t) muy prolongado y un t_0 de retardo para iniciar el crecimiento de la película (periodo de nucleación) y τ es una constante de tiempo característica que depende de la composición y temperatura del baño químico [33]. Las películas 1h-2S (una hora en un lado) y 2h-2S (dos horas en dos lados) se prepararon con soluciones nuevas para cada lado, duplicando así su espesor total. Sin embargo, a causa del crecimiento no



lineal de la película proveniente de un baño químico con una concentración de iones disponibles agotados o disminuidos, una película depositada por 2h en un lado (110 nm) será más delgada que una película depositada por 1 h en ambos lados de la hoja de PET (70 nm+ 70 nm= 140 nm), y de aquí que su transmitancia óptica también será menor.

4.3 Resistencia adhesiva interfacial en vidrios laminados, experimental.

Las pruebas mecánicas o de resistencia adhesiva interfacial se realizaron de acuerdo a la descripción del apartado 3.4, del capítulo 3. La Figura 4.2 muestra los valores de la resistencia adhesiva interfacial en las probetas analizadas. Estos valores son el promedio de probar cinco probetas de cada tipo. Las barras de error indican dispersión en los valores. En general, el laminado con PET, con o sin recubrimiento de control solar en un solo lado (1S), presenta una resistencia adhesiva de 2 a 2.4 MPa. Sin embargo, los laminados con películas depositadas durante dos horas en ambos lados de la hoja de PET (2h-2S) muestran un incremento sustancial en la resistencia adhesiva, alcanzando valores de 3.4 MPa, bastante alejados de la barra de error de las muestras 1S. Esto indica que la interfaz más débil es PBV/PET y no la interfaz PET-CuS. Es importante mencionar que la unión entre Vidrio/PVB alcanza valores de adhesión que van de los 7 a los 11 MPa, que es la norma de la industria productora de parabrisas automotrices [34]. La ventaja que tienen estos vidrios laminados, es que reducen la ganancia de calor a través de estos hasta un 50%, aunque comprometiendo la resistencia mecánica en la misma magnitud.

La resistencia adhesiva mínima la presentaron los laminados 2h-1S (Cus depositado por 2h sobre una cara de la hoja de PET), lo cual coincide con los valores reportados



en [18]. La resistencia adhesiva interfacial de la muestra de referencia es similar a las muestras 1S, similar a lo reportado en [35]. Los resultados obtenidos se pueden explicar porque en la interface vidrio/PVB la superficie del vidrio es dominada por grupos polares silano Si-OH, que se forman en la superficie por la absorción de agua con un ataque hidrolítico posterior en el enlace del vidrio Si-O-Si. Estos grupos de silanol se combinan con los grupos del alcohol del PVB para formar una red reversible, pero densa, de débiles enlaces de Hidrógeno y más allá de este punto, enlaces químicos verdaderos. Para hacer esto, se debe permitir que el PVB fluya y adopte la forma que se ajuste perfectamente a la superficie rugosa del vidrio.

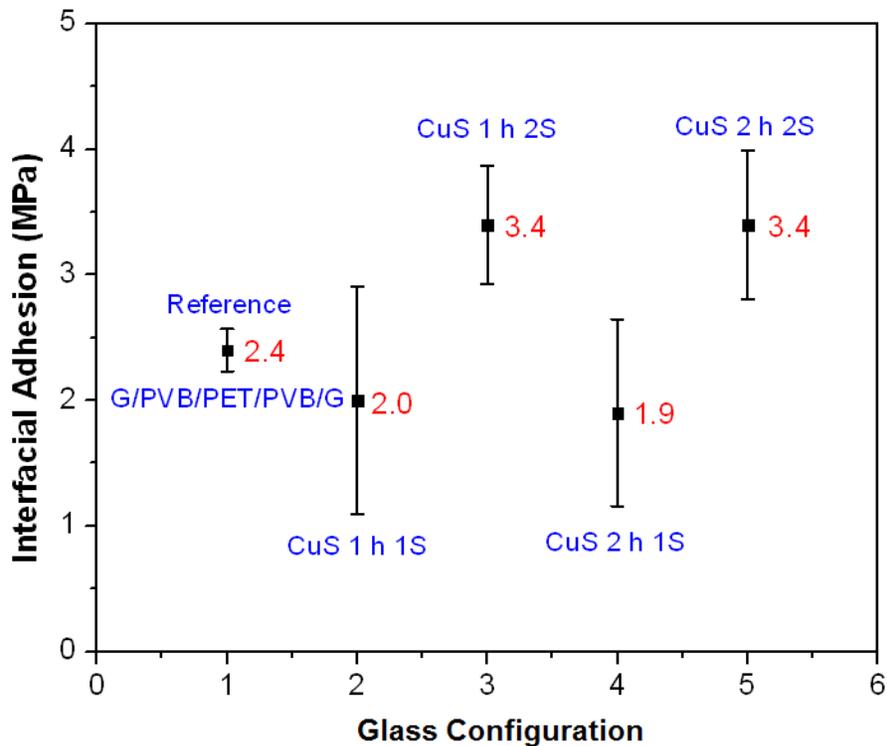


Figura 4.2 Resistencia adhesiva interfacial en vidrios laminados de control solar.



Por otra parte, la interface PVB/PET se comporta de una forma diferente debido a la naturaleza hidrofóbica del PET. En este caso es necesario modificar la superficie del PET con algún tratamiento específico para mejorar su adhesión al PVB. El tratamiento superficial de flama de plasma se utiliza para introducir grupos funcionales que contienen oxígeno (incluyendo hidroxilos, carbonilos y carboxilos) en la superficie de poliolefinas, volviendo su superficie más hidrofílica [36]. Este tratamiento se puede utilizar para modificar las superficies de las hojas de PET, introduciendo grupos hidroxilo que se pueden combinar con los grupos alcohol para hacer una unión más fuerte del PVB y el PET.

4.4 Resistencia adhesiva interfacial en vidrios laminados, analítica.

Otra forma de evaluar la resistencia adhesiva interfacial es mediante el trabajo de adhesión y el esfuerzo espontáneo en los laminados, descritos por Rabinowicz [37] y Dillard and Pocius [38], respectivamente. Para determinar estos valores se tienen que determinar las energías superficiales de cada componente, quedando de la siguiente forma: Vidrio (24 mJ/m^2), PVB (39.8 mJ/m^2), CuS (51.2 mJ/m^2) y PET (48.4 mJ/m^2). También es necesario determinar el módulo de Young (E) y la razón de Poisson (ν) para cada componente: vidrio ($E=72 \text{ GPa}$; $\nu =0.25$), PVB ($E=0.95 \text{ GPa}$; $\nu =0.5$), CuS ($E=110 \text{ GPa}$; $\nu =0.34$) y PET ($E=2.7 \text{ GPa}$; $\nu =0.36$) [9-12].



Tabla 4.2 Trabajo de adhesión y esfuerzo espontáneo de fractura de las uniones adhesivas en un vidrio laminado.

Unión adhesiva	Trabajo de adhesión Wab [mJ/m ²]	$\sigma = \left[\frac{2dEW_{ab}}{s^2(1-\nu^2)} \right]^{1/2} [N/m^2]$
Vidrio-PVB	63.8	34,135.9
PVB-PET	88.2	40,136.1
PVB-CuS	91.0	40,768.2
CuS-PET	99.6	34,239.7

Tabla 4.3 Esfuerzo adhesivo total en laminados.

Tipo de laminado	$\sigma_{tot} = C \sum_{j=1}^i (\sigma_i + 2\sigma_{j-1}) [N/m^2]$
Vidrio-PVB	2,425,860
PVB-PET	1,550,269
PVB-CuS	3,110,560

El comportamiento de los laminados, mostrado en la Figura 4.2 y en las Tablas 4.2 y 4.3 muestra que la elevada energía superficial de adhesión del CuS incrementa la resistencia adhesiva de laminado en las muestras que tienen CuS en ambas caras del PET. Sin embargo, se experimenta una reducción en resistencia adhesiva cuando se usa el CuS en un solo lado de la hoja de PET. Este resultado se puede atribuir al cambio de signo del momento entre los laminados individuales [38]. Como se describe en [38] entre mayor sea el número de hojas en el laminado, menor serán la resistencia adhesiva entre éstas. Lo anterior explica los valores mayores de adhesión



para el vidrio de referencia (V/PVB/V), comparado con aquellos que tienen cinco capas. Los valores presentados en la Tabla 4.2 para el esfuerzo espontáneo de fractura fueron evaluados de tal forma que la influencia del espesor de la película se debe tomar en cuenta. Basado en esto, la influencia de las películas de CuS se puede apreciar en las dos últimas líneas de dicha Tabla.

El vidrio laminado con PET-CuS desarrollado en esta tesis no cumple con los estándares de seguridad que rigen a los parabrisas de coches (aplicaciones automotrices). Sin embargo, se pueden aplicar en edificaciones, debido a la capacidad que presenta el laminado de fracturarse ante un impacto a baja velocidad y mantener unidos los fragmentos de vidrio, evitando así daños personales.

4.5 Conclusiones finales del trabajo

Se obtuvieron las propiedades ópticas y mecánicas de vidrios laminados de control solar con películas semiconductoras de control solar. Los valores de transmitancia son cercanos a cero en la región ultravioleta, de 17-32% en la región visible y de 4 a 12% en la región del cercano infrarrojo. La resistencia adhesiva en los laminados que usaron PET con película de CuS depositada en ambos lados fue casi 58% mayor que en las que utilizaron CuS en un solo lado.



Bibliografía

- [1] C. Sheinbaum-Pardo, Análisis y alternativas de política energética nacional, *Argumentos*, vol. 21, nº 58, pp. 11-29, 2008.
- [2] SEMARNAT, Cambio climático. Ciencia, evidencia y acciones, México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2009.
- [3] A. Papparelli, A. Kurban y M. Cunsulo, Aporte del diseño bioclimático a la sustentabilidad de áreas urbanas en zonas áridas, *Boletín del Instituto de Vivienda*, vol. 18, nº 46, pp. 61-68, Enero 2003.
- [4] C. L. Z. L. Tin-Tai Chow, Innovative solar windows for cooling-demand climate, *Solar Energy Materials & Solar Cells*, p. in press, 2009.
- [5] J. Stockdale, Glass: a small part of the climate change problem, a large part of the solution, *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, vol. 28, pp. 53-58, 2009.
- [6] J. Aguilar, O. Gómez-Daza, M. Nair, P. Nair y A. Brito, Resistencia adhesiva interfacial de vidrios laminados con películas delgadas semiconductoras, *Superficies y vacío*, vol. 17, nº 2, pp. 15-20, 2004.
- [7] E. Rosenfeld, G. San Juan, C. Discoli, I. Martini, C. Ferreyro, D. Barbero, B. Brea, M. Melchiori, G. Viegas, L. Dicroce y J. Ramírez-Casas, Ahorro de energía en el sector residencial. Su contribución a la disminución de gases de efecto invernadero (GEI), *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, vol. 11, pp. 7.31-7.38, 2007.
- [8] X. Labandeira-Villot, X. López-Otero y M. Rodríguez-Méndez, "Cambio climático y reformas fiscales verdes, *Economiaz*, nº 67, pp. 30-47, 2008.
- [9] Secretaría del Medio Ambiente para el Desarrollo Sustentable, Edificación sustentable en Jalisco, Guadalajara, Jalisco: Prometeo, Editores, 2009, p. 302.
- [10] WWF/Adena, Guía para el ahorro energético en el hogar, A. Asiaín y Vega Isaac, Edits., Madrid, 2008, p. 32.
- [11] G. Jacoby y R. D'Arrigo, Tree rings, carbon dioxide, and climate change, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, vol. 94, nº 16, pp. 8350-8353, 1997.
- [12] M. Mann, R. Bradley y Hughes M.K., Global-scale temperature patterns and climate forcing over the past six centuries, *Nature*, vol. 392, pp. 779-787, 1998.



- [13] J. Marco, L. Uliaque y F. Villuendas, Diseño y producción de recubrimientos de control solar energético para su utilización en vidrio laminado, *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, vol. 40, nº 2, pp. 113-119, 2001.
- [14] M. y. Metha, Window glass design practice: a review, *J. Structural Division*, p. 1, 1981.
- [15] K. P. A. D. L. R. J. F. S. a. K. N. D. Bher R A, Dynamic Strains in Architectural Laminated Glass Subjected to Low Velocity Impacts from Small Projectiles, *J. Mat. Sci.*, 34, p. 5749, 1999.
- [16] J. Aguilar, O. Gómez-Daza, A. Brito, M. T. S. Nair y P. K. Nair, Optical and mechanical characteristics of clear and solar control laminated glass using zinc sulphide and copper sulphide thin films, *Surface and Coating Technology*, 200 (2005) 2557-2565.
- [17] Jagota A, Bennison S J y Smith C A, Analysis of a Compressive Test for Adhesion Between Elastomeric Polymers and Rigid Substrates, *Int. J Fracture*, 104(2000) 105.
- [18] J. O. Aguilar, Desarrollo de Arreglos de Vidrios Laminados con Recubrimientos Espectralmente Selectivas para Aplicaciones Selectivas para Aplicaciones Arquitectónicas y Automotrices, Tesis Doctoral, CIE-UNAM, 2005.
- [19] O. G. D. J. G. M. N. y. P. N. V.M. Garcia, Películas delgadas de selenuro de cobre químicamente depositadas: aplicación como material controlador de radiación solar., Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Autónoma de Zacatecas, km. 0.5 carr. A cd. Cuactemoc, 98600 Guadalupe, Zacatecas, Apdo. postal 461; y Departamento de Materiales Solares, Centro de Investigación en Energía, UNAM, 62580 Temixco, Morelos, México, pp. 300-305, 1998.
- [20] H. H. P. S. P. N. y. M. N. A.M. Fernández, Empleo de películas protectoras para evitar la degradación en los recubrimientos que controlan la radiación solar., Grupo de Sistemas Fotovoltaicos, Laboratorio de Energía Solar, Instituto de Investigaciones en Materiales, UNAM, 62580, Temixco, Morelos, México., , pp. 209-214, 1993.
- [21] G. Sánchez-Pool, Degradación Óptica de Películas Delgadas Semiconductoras Nanoestructuras, Chetumal, Quintana Roo: Tesis de Licenciatura. Universidad de Quintana Roo, 2009.
- [22] P. S. A. F. P. N. y. M. N. Hailin Hu, Propiedades ópticas de algunas películas delgadas de calcogenuros metálicos en sustratos poliméricos para



- aplicaciones de ventanas selectivas., Grupo de Sistemas Fotovoltaicos, Laboratorio de Energía Solar, IIM, UNAM, 62580 Temixco, Morelos, México., pp. 215-218, 1993.
- [23] S.-D. C., Películas delgadas Epitaxiales de Sr₄Fe₆O₁₃ obtenidas mediante PLD: Relación entre Microestructura y Propiedades de Transporte Electrónico a Alta Temperatura. Tesis Doctoral. Departamento de Física. Universitat Autònoma de Barceona., 2007.
- [24] González-Alcudia M. y Zapata-Torres M., Crecimiento de películas de CdTe:Al, Revista Mexicana de Física. Soc. Mex. Fís. Vol. 52, pp. 48-52, 2005.
- [25] Correa M. G., Fabricación de Filtros Solares para Ahorro de Energía con Recubrimientos de Cu₂O-CuS y VO₂, Tesis doctoral. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México., 2002.
- [26] Nair P.K. y Nair M.T.S., Chemically Deposited Solar Control Coatings: An Update. *Surfac Modifications*, vol. IV, pp. 609-634.
- [27] Minor J E and Beason W L, «Window Glass Failures in Windstorms,» *J. Structural Division* 102, p. 147, 1976.
- [28] "CONAE", [En línea]. Available: http://www.conae.gob.mx/wb/CONAE/CONA_9_desde_el_hogar. [Último acceso: 20 abril 2009].
- [29] J. R. Herrera-Reséndiz y A. Estrada-Monje, Depolimerización de botellas de poli(tereftalato de etileno) (PET) post-consumo mediante glicólisis. i. efecto del catalizador y del tipo de glicol., *Revista iberoamericana de polímeros*, Vol. 13(3) Julio de 2012.
- [30] www.trosifol.com/index1024.html.
- [31] J.O. Aguilar, G. Sánchez-Pool, C. López-Mata, R. Acosta, J. Hernández, O. Gómez-Daza y J. Campos, Degradación de películas delgadas de sulfuro de cobre en ambiente costero, pp. 6-12, 2010.
- [32] ISO 9050:2003, Standard test method: Glass in building – Determination of light transmittance, solar direct transmit- tance, total solar energy transmittance, ultraviolet transmit- tance and related glazing factors.
- [33] Arias-Carbajal Reádigos, V. M. García, O. Gómez-Daza, J. Campos, M. T. S. Nair and P. K. Nair, Substrate spacing and thin-film yield in chemical bath deposition of semiconductor thin films, *Semicond Sci Technol*, 15 (2000) 1022.
- [34] Sekurit Saint Gobaint Glass, SSGG, Assurance Quality Department, 2006.



- [35] J. C. Anderson, Use of PET film primed with polyallylamine coating in laminated glass glazing construction, United States Patent No. US 7189457 B2, march 13, 2007. Available on <http://www.freepatentsonline.com/7189457.pdf>, last access: July 21th (2010).
- [36] Pascoe R.D., and Connell, B.O., Flame treatment for the selective wetting and separation of PVC and PET, *Waste Management*, 23 (2003) 845-850.
- [37] Rabinowicz E., *Friction and wear of materials*, Ed. John Wiley and Sons, ISBN 0-471-83084-4.
- [38] Dillard D.A., and Pocius A.V., *The mechanics of adhesion*, Elsevier Science (2002).



Anexos

Publicaciones derivadas de este trabajo de tesis:

- [1] J. O. Aguilar, J. M. Rodríguez-Lelis, M. Carrasco de la Fuente, C. López-Mata, J. A. Arellano-Cabrera and F. Chan, **Adhesion strength in laminated glazings containing multilayer solar control coatings**, Journal of Mechanical Science and Technology 26 (6) (2012) 125-1730.