



10
21

**UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTONOMA DE MEXICO**

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
"CUAUTITLAN"**

**CONSIDERACIONES PARA LA
CONSTRUCCION DE SUPERFICIES
PLASTICAS REFLEJANTES UTILIZADAS
EN COLECTORES SOLARES
CONCENTRADORES.**

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA**

**P R E S E N T A :
MAURICIO DE ALBA ROSANO**

**TESIS CON ASesor: ING. FILIBERTO LEYVA PIÑA
FALLA DE ORIGEN**

CUAUTITLAN IZCALLI, EDO. DE MEX.

1997



Universidad Nacional
Autónoma de México



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.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN
UNIDAD DE LA ADMINISTRACIÓN ESCOLAR
DEPARTAMENTO DE EXÁMENES PROFESIONALES

U. N. A. M.
FACULTAD DE ESTUDIOS
SUPERIORES CUAUTITLÁN

ASUNTO: VOTOS APROBATORIOS



DEPARTAMENTO DE
EXÁMENES PROFESIONALES

AT'N: Ing. Rafael Rodríguez Castellón
Jefe del Departamento de Exámenes
Profesionales de la F.E.S. - C.

Con base en el art. 28 del Reglamento General de Exámenes, nos permitimos comunicar a usted que revisamos la TESIS TITULADA:

"Consideraciones para la construcción de superficies plásticas reflectantes
utilizadas en colectores solares concentradores"

que presenta el sesante: Mauricio de Alba Rosado
con número de cuenta: 9160184-7 para obtener el TÍTULO de:
Ingeniero Mecánico Electricista

Considerando que dicha tesis reúne los requisitos necesarios para ser discutida en el EXÁMEN PROFESIONAL correspondiente, otorgamos nuestros VOTOS APROBATORIOS.

ATENTAMENTE

"POR MI RAZA HABLARÉ EL ESPÍRITU"

Cuautitlán Iscalli, Edo. de Méx., a 2 de Octubre de 1976

PRESIDENTE

Ing. Piliberto Leyva Piza

VOCAL

Ing. José Antonio Sánchez Gutiérrez

SECRETARIO

Ing. Eduardo Covarrubias Chávez

PRIMER SUPLENTE

Ing. Bernardo Muñoz Martínez

SEGUNDO SUPLENTE

Ing. Enrique Cortés González

Dedico este trabajo con todo mi amor y agradecimiento a mis padres, Miguel y Guadalupe, por haberme guiado durante toda mi vida.

A mis hermanos: Miguel, Marcos, Evelyn y Catalina Fabiola, con cariño.

Y mis amigos todos.

Agradecemos al Ing. Filiberto Leyva Fina por el tiempo dedicado para la realización de este trabajo.

A los profesores del departamento de física por su apoyo. Muy especialmente a mi amigo el Ing. Pedro Guzman Escobedo.

A la Universidad Nacional Autónoma de México.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCION	7
Capítulo I Investigación de las características del plástico	8
1.1 Clasificación de los plásticos	11
1.2 Propiedades de los plásticos	13
1.2.1 Propiedades químicas	14
1.2.2 Propiedades físicas	16
1.2.3 Propiedades mecánicas	21
1.2.4 Propiedades dimensionales	23
1.3 Selección del plástico a utilizar	23
1.4 Búsqueda del material	33
Capítulo II Desarrollo del proceso de metalizado	34
2.1 Tipos de metalizado	34
2.2 Selección del proceso de metalizado	37
2.3 Desarrollo del proceso de vaporizado en alto vacío	38
2.3.1 Instalaciones para el vaporizado de piezas de plástico al vacío	41
2.4 Material y fuentes de vaporizado	44
2.5 Importancia de las propiedades del plástico para el proceso de vaporizado	47

Capítulo III Cuantificación de la reflectividad	50
3.1 Interacción de la radiación electromagnética con la materia	50
3.2 Muestras plásticas aluminizadas	52
3.3 Equipo para la medición de la reflectividad	53
3.4 Reflectividad de las muestras aluminizadas	54
Capítulo IV Consideraciones para la construcción de superficies plásticas reflejantes	64
4.1 La superficie plástica	65
4.2 Metalizado de la superficie	66
4.3 Pegado de la superficie metalizada al colector	67
4.4 Costo de la superficie reflejante	69
Conclusiones	70
Bibliografía	72
Anexo A Lista de proveedores de las muestras aluminizadas	73
Anexo B Gráficas de reflectividad de diferentes plásticos	74

INTRODUCCION

En busca del aprovechamiento de la energía solar, un grupo de profesores de aquí, de la F.E.S. Cuautitlán, ha puesto su interés en desarrollar equipos que utilicen dicha energía; uno de estos equipos es un concentrador cilindro-parabólico.

Uno de los problemas que se presentó en la construcción de este concentrador fué la manera de sujetar los espejos (hechos de acrílico metalizado) a la base; en su exposición al sol, los espejos se dilataron, presentándose ondulaciones que formaron averraciones en la franja focal, además la capa metálica del espejo se desprendió del acrílico en algunos puntos, ésto sucedió presuntamente por la dilatación de los espejos y por el esfuerzo de éstos para mantener su forma horizontal. Dichos problemas con la superficie reflejante dieron lugar a este trabajo.

El presente trabajo es un estudio de comparación entre los distintos materiales plásticos que pueden encontrarse fácilmente en el mercado, y que pueden ser utilizados en la construcción de una superficie reflejante de un colector solar de canal parabólica. Entre los principales puntos de comparación están: durabilidad y costo del plástico, propiedades ópticas del plástico y del metal a usar, y adherencia del metalizado al plástico.

Como resultado del estudio se pretende determinar cuál plástico representa la mejor opción en cuanto a vida útil, reflectividad y costo.

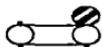
CAPITULO I

Investigación de las características del plástico

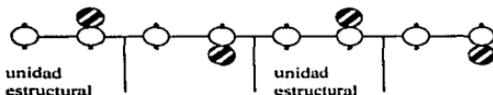
Los materiales polímeros[1] que usamos hoy en día en máquinas, paquetería, automóviles, y otros usos no son polímeros extraídos de la naturaleza. Son hechos por el hombre, y a partir de hace 50 años han cobrado importancia como materiales de ingeniería. La Segunda Guerra Mundial se caracterizó por la escasez de materiales, y fué cuando la evolución de los polímeros tuvo lugar a un paso acelerado. El nylon reemplazó a la seda, el vinil a las pieles, etc. Hoy en día existen miles de polímeros que tienen utilidad dentro de la ingeniería.

El término polímero es usado igualmente que el término plástico. Ninguno de los dos es exacto. Plástico significa flexible, y la mayoría de los polímeros que se usan en ingeniería no son flexibles a temperatura ambiente. Por otro lado, el término polímero puede incluir todo tipo de material hecho por medio de la polimerización de moléculas que se repiten. La definición (D883) de la ASTM de un plástico es "Aquel material que contiene como ingrediente esencial una sustancia orgánica de peso molecular grande, que es sólido en su acabado final, y que en algún paso de su manufactura haya sido un fluido." Para no caer en una larga discusión de semántica se ha optado por utilizar el término polímero al hablar de la formación química de los polímeros y el término plástico para designar a los materiales polímeros en su acabado final.

Los polímeros[2] son sustancias compuestas de cadenas de moléculas que se repiten. En contra posición al producto de reacción polímero, se denomina monómero al material inicial antes de reaccionar. Estos grupos atómicos constituyen pues, en cierto modo, los "sillares" de la macromolécula. Una de estas unidades se agrupa por lo común alrededor de dos o más átomos de carbono que en un principio estaban unidos entre sí por medio de dobles enlaces. Estos se rompen al formarse la macromolécula, pudiendo cada átomo de carbono formar un enlace sencillo en dos direcciones. En el caso más simple se une una unidad detrás de otra como los eslabones de una cadena; en este caso moléculas filiformes, o también sustancias de constitución lineal. Lo anterior se muestra en la figura 1.1



Substancia inicial monómera



Cadena Polímera

○ carbono

· hidrógeno

◐ cloro

Fig 1.1 Polimerización

Existen básicamente[1] dos tipos en que una molécula puede unirse a otra: (1) las moléculas pueden unirse físicamente unas a otras, en forma de cadena; (2) una molécula puede unirse a otra nueva cuando ésta es formada por una reacción química. El primer proceso se llama polimerización por adición; el segundo polimerización por condensación. En la polimerización por adición, el material inicial es un monómero en una solución, emulsión o vapor, y el polímero resultante tiene la misma unidad repetida que el monómero inicial. En la polimerización por condensación, las moléculas que se repiten en la cadena polímera son diferentes a los materiales iniciales. Normalmente el producto que se obtiene de la reacción química es agua. Por eso el nombre de condensación.

Un catalizador o una elevada presión o temperatura pueden ser necesarios para iniciar cualquiera de los dos tipos de polimerización. La longitud (peso molecular) de la cadena polímera puede, en muchos casos, ser controlada por algún parámetro del proceso o por el tipo de catalizador. Esto es importante.

debido a que la longitud de la cadena tiene profundos efectos en las propiedades del material.

1.1 Clasificación de los plásticos

Existen varios criterios[3] que se pueden usar para clasificar a los plásticos. El sistema más viejo y quizás obsoleto, pero que todavía se utiliza es el de plásticos termofijos y plásticos termoplásticos; el problema es que ciertos plásticos y posiblemente algún día todos los plásticos pueden clasificarse en cualquiera de los dos grupos. El agrupar en termofijos y termoplásticos es una clasificación muy útil desde el punto de vista del proceso, ya que nos indica que tipos de procesos se pueden aplicar a un determinado plástico. Por ejemplo, una lámina termoplástica puede usarse como producto final o bien calentarse y moldearla de nuevo. En cambio un plástico termofijo que ha sido moldeado no puede ser recalentado para darle otra forma. Clasificar a los plásticos como lineales o entrecruzados es un sistema que nos ayuda a determinar las propiedades generales. Por ejemplo, los plásticos lineales pueden ser continuamente remodelados y normalmente tienen baja resistencia al calor, mientras que los entrecruzados tienen mayor resistencia al calor y a los químicos. Otra clasificación envuelve la naturaleza del material: rígido, flexible o elástico. Una clasificación fuertemente conectada con la naturaleza del material es la del uso, uso general o para ingeniería. El uso general incluye a la mayoría de los plásticos que encontramos a diario, como la celulosa, los acrílicos y los vinilos. Los plásticos de ingeniería son aquellos que substituyen a materiales tradicionales como el acero y la madera. Dentro de éstos podemos incluir a los policarbonatos, nylons y poliuretanos. La mayoría de los plásticos de ingeniería son considerados plásticos estructurales capaces de soportar grandes cargas.

Como puede verse un plástico puede caer en varias de las clasificaciones anteriores.

Termofijos .- Los plásticos termofijos[4] son plásticos compuestos que se fijan o entrecruzan al aumentar su calor. El entrecruzarse es en realidad la formación de enlaces químicos entre las cadenas de carbono (ver figura 1.2).

Los enlaces químicos adicionales del plástico termofijo le permiten absorber más calor antes de que la cadena de carbono se rompa. Esta es la razón por la que estos plásticos normalmente son capaces de soportar más altas temperaturas, y proveer una buena resistencia eléctrica y química.

El proceso es irreversible. Una vez fijo, el plástico no puede regresar a su estado anterior. Es como hornear un pastel. Los ingredientes se mezclan y la masa se hornea. Si el cocinero no está satisfecho con el resultado no hay manera de repararlo.

Termoplásticos .- Los termoplásticos se ablandan con el calor y endurecen al enfriarse. Este proceso es reversible. A diferencia de los termofijos, en los termoplásticos no hay enlaces entre las cadenas de moléculas (ver figura 1.2), pero la manera en que las moléculas de los termoplásticos se colocan unas junto a otras y las fuerzas intermoleculares que las mantienen unidas afectan sus propiedades y su clasificación.

El enredarse aleatoriamente las moléculas de los termoplásticos les da una estructura amorfa. Amorfo significa sin ningún orden lógico. Los termoplásticos amorfos pueden ser claros, tener propiedades uniformes en todas direcciones (isotrópicos), y tener un rango de fusión en vez de un punto de fusión.

Las moléculas que tienen un orden entre ellas se llaman semicristalinas. A diferencia de la estructura de cristal en sales y metales, semicristalino en termoplásticos se refiere a un orden ocasional donde las moléculas se acomodan linealmente unas respecto a otras (ver figura 1.2). Los termoplásticos semicristalinos se caracterizan por su opacidad, propiedades no uniformes, y distinto o estrecho rango de fusión.

TERMOFIJOS



Enlaces cruzados

TERMOPLÁSTICOS



Amorfo



Semi-cristalino

Fig. 1.2 Clasificación de los plásticos

1.2 Propiedades de los plásticos

Las variaciones[3] aproximadamente infinitas de estructuras en los plásticos proveen una amplia gama de propiedades que continúan creciendo anualmente debido a las demandas que la tecnología impulsa en la manipulación de estructuras poliméricas. Los aditivos y llenadores (*fillers*) afectan significativamente las propiedades del plástico.

La mayoría de los plásticos son verdaderos compósitos debido a los aditivos que contienen para alcanzar sus propiedades. Más allá de los catalizadores que se adicionan para iniciar la polimerización, los aditivos sirven para incrementar la facilidad de procesamiento, reducir la oxidación, dar color, reducir el peso molecular, aumentar la flexibilidad, reforzar, retardar la inflamabilidad o incrementar la conductividad eléctrica. Los estabilizadores se adicionan en la mayoría de los plásticos para prevenir que absorban elementos externos que pueden causar degradación. Por ejemplo, la radiación ultravioleta y el oxígeno (ozono) pueden alterar los enlaces químicos de los plásticos y crear radicales libres. Los radicales libres son segmentos dentro del polímero que fácilmente se pueden combinar con otros elementos y causar la falla de la estructura del plástico o alterar severamente sus propiedades.

A continuación se presenta la figura 1.3 donde se mencionan las principales propiedades que deben considerarse en la selección de un plástico. Para nuestra aplicación específica más adelante se incluirán otras y se despreciarán algunas.

1.2.1 Propiedades químicas

Son propiedades del material que se relacionan a su estructura y a los elementos de que esta formado. Estas propiedades son medidas usualmente en laboratorios, y no pueden ser determinadas por observación visual. Normalmente es necesario cambiar o destruir una muestra para medir una propiedad química.

Los plásticos[3] no se corroen en la misma forma que los metales, pero están sujetos al ataque químico y a deteriorarse. Mientras la *corrosión* de los

metales es determinada por pérdida de peso, el deterioro de un termoplástico es medido por su ganancia de peso debido a que los químicos que lo atacan se combinan con el plástico. El resultado es normalmente decoloración, hinchazón, o finas rupturas con la correspondiente pérdida de resistencia a la tensión, la flexión y el impacto.



Fig. 1.3 Principales propiedades de los plásticos.

Al igual que con las propiedades mecánicas, la *resistencia química* decrece en los plásticos conforme se incrementa la temperatura. A los plásticos se les hacen pruebas para probar su resistencia a ácidos débiles y fuertes, solventes orgánicos y absorción de agua. Algunos ácidos fuertes incluyen el ácido nítrico y el hidróclorito, y los ácidos débiles incluyen al ácido láctico, bórico y cítrico. Entre los solventes orgánicos comunes están la gasolina, alcohol y acetona. La comparación al desgaste incluye muchos esfuerzos químicos como el calor, humedad, luz ultravioleta, y químicos en el aire como el ozono y el ácido hidróclorito. Los fluorocarbonos debido a que son inertes presentan una gran resistencia a los ácidos débiles, a los solventes, a la absorción de agua y al

desgaste. Los polietilenos de alta densidad (HDPE) tienen gran resistencia a los ácidos, a la absorción de agua, y al desgaste, que, junto con su bajo precio, los hacen buenos candidatos para numerosas aplicaciones de empaquetado como las botellas utilizadas para el hogar y la industria; también sirven como aislantes para los cables eléctricos, tanques de almacenamiento de aceite, etc. Los acrílicos tienen gran resistencia al clima, lo que los hace buenos como ventanas debido a su alta resistencia al impacto y a que transmiten hasta el 92% de la luz. La absorción de humedad causa hinchazón en los plásticos, lo que crea problemas cuando se desea una gran exactitud en uniones, por lo que se requerirá un plástico con muy baja absorción de agua. Los poliésteres tienen una gran resistencia a la absorción de agua, por lo que sirven muy bien para aplicaciones marinas.

El rango de *flamabilidad* de los plásticos es muy amplio. Generalmente, los termoplásticos son más inflamables que los termofijos. Los termoplásticos pueden romperse en pedazos y mezclarse para reciclarse. Mientras los termofijos tienen el potencial para reciclarse a través del uso de solventes químicos, pero económicamente puede ser que no sea una buena aplicación. Sin embargo, los termofijos pueden utilizarse como relleno en algunos compósitos. La alta energía térmica de los termofijos les da un valor como fuente de energía, la pedacaría es quemada para generar calor y accionar turbinas de vapor utilizadas en la generación de energía eléctrica.

1.2.2 Propiedades físicas

Son propiedades que relacionan a los materiales con varias formas de energía y con otras formas de materia. Pueden normalmente ser medidas sin cambiar o destruir el material. El color es una propiedad física, éste puede ser

determinado simplemente mirando la substancia. La densidad puede determinarse pesando y midiendo el volumen de un objeto; el material no tiene que ser cambiado ni destruido para medir ésta propiedad.

Muchos plásticos pierden su resistencia a bajas temperaturas. La comparación de las temperaturas de trabajo revelan que la mayoría de los plásticos no pueden resistir más de 150°C cuando están bajo algún esfuerzo o ninguno. Pequeños incrementos en el esfuerzo reducen la temperatura de trabajo continuo aun más. Nuevos plásticos, como las resinas poliamidas, resisten incrementos intermitentes por arriba de los 500°C estando sometidos a pequeños esfuerzos y por arriba de 250°C pueden resistir miles de horas.

La temperatura de transición al estado vítreo (T_g) es el punto en el cual los polímeros se comportan como vidrio o líquido congelado. Al enfriarse, el intercambio térmico de los átomos y de las cadenas de moléculas disminuye, y el volumen del plástico también, ya que las moléculas se acercan más entre ellas. Cuando esto sucede, muchos polímeros no forman cristales como lo hacen los metales; sino que se congelan en una estructura amorfa y vítrea. Por supuesto, polímeros altamente cristalinos como el polietileno de alta densidad (HDPE) no siguen este patrón, así, el grado de cristalinidad de los plásticos controla a T_g . El resultado de enfriar al punto vítreo a polímeros no cristalinos es que éstos se vuelven frágiles. En plásticos cristalinos con baja T_g , como el polipropileno a -10°C, la flexibilidad y la resistencia al impacto se mantienen. Al recalentarse un termoplástico amorfo, pasa de un estado vítreo y frágil a través de su punto vítreo, y entonces forma una goma dura que gradualmente se suaviza y pasa a un estado más flexible hasta que llega a ser un líquido muy viscoso al alcanzar su punto de fusión (T_m).

Los puntos exactos de fusión son determinados ópticamente en plásticos semicristalinos y cristalinos como la pérdida de la doble refracción (*birefringence*) debido al cambio de estructura al pasar del estado cristalino al vítreo. Un plástico lineal y amorfo será muy quebradizo y no se volverá un fluido viscoso debajo de su T_g pero será muy rígido y elástico. Conforme aumente el grado de cristalinidad en un plástico, se volverá más viscoso y menos capaz de recobrase de una deformación.

El tiempo es un factor importante en los plásticos que soportan una carga. Un polímero lineal amorfo estirado a temperatura mayor que su T_g después de un tiempo comenzará a deformarse sin ninguna carga adicional o aumento de calor conforme las cadenas moleculares se desenredan a través del flujo viscoso; esto es relajamiento por estiramiento (*stress relaxation*). Un polímero termofijo con enlaces entrecruzados a relativamente bajas temperaturas que esté soportando una carga durante un largo periodo de tiempo comenzará a deformarse y continuará deformándose perdiendo su resistencia; esto es deslizamiento (*creep*). La temperatura de suavizamiento de los polímeros puede incrementarse a través del aumento del peso molecular o el aumento de longitud de la cadena polímera. Los termoplásticos son más propensos al deslizamiento que los termofijos. Lo anterior se ilustra en la figura 1.4

En la figura 1.5 se muestran los efectos del tiempo y la temperatura en los plásticos.

Efecto de una fuerza aplicada a un plástico

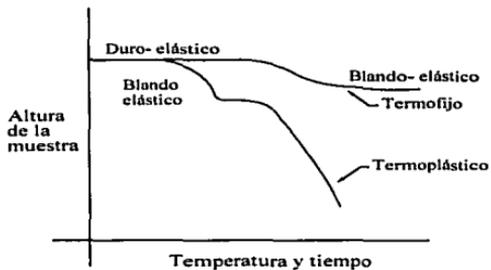
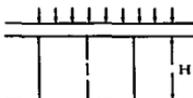


Fig. 1.4 Efecto de una fuerza aplicada a un plástico

Efectos del tiempo y la temperatura en la resistencia mecánica

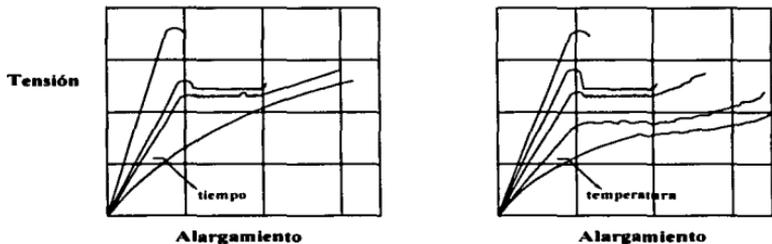


Fig. 1.5 Efectos del tiempo y la temperatura en plásticos.

La *conductividad térmica* es baja en la mayoría de los plásticos, lo que

los hace valiosos como aislantes térmicos. En estado espumoso, las cavidades de aire, no transmiten calor, aumentando las propiedades térmicas. Sin embargo, el rango de dilatación (*thermal expansion*) es mucho mayor en la mayoría de los plásticos, generalmente diez veces mayor que el de los metales.

Muchos plásticos tienen *propiedades ópticas* comparables con el vidrio pero ofrecen mayor resistencia al impacto, además, se procesan más fácilmente y cuando se rompen no producen astillas. La opacidad se desarrolla con el incremento en la cristalinidad, o sea, en una estructura amorfa produce transparencia. Una película de polietileno de baja densidad utilizada para empacar comida es clara, mientras una botella para detergente hecha de polietileno de alta densidad es opaca. Los acrílicos están disponibles en una ilimitada variedad de colores y pueden ser transparentes (transmisión de luz del 92%) como el más fino vidrio óptico o pueden hacerse opacos. Los acrílicos tienen un índice de refracción de 1.49. El índice de refracción indica la relación de la velocidad de la luz a través de algún material comparada con la velocidad de la luz en el vacío. Mayores valores indican mayor distorsión de la luz. Los plásticos translúcidos dejan pasar la luz pero los objetos no pueden verse claramente.

Algunos plásticos como los acrílicos, poliésteres, celulosas, y poliestirenos, muestran las concentraciones de esfuerzos de una manera coloreada cuando son vistos a través de un filtro de luz polarizado. Este efecto fotoelástico es usado como una herramienta de diseño. El plástico es moldeado y sometido a esfuerzo bajo una luz polarizada para determinar que zonas estarán bajo mayor esfuerzo, esto permite aumentarle material a la pieza o rediseñarla para que soporte las cargas esperadas.

La *densidad* de los plásticos es generalmente menor que la de otros materiales de ingeniería y de uso general. Aun los plásticos reforzados con otros materiales son más ligeros que el acero y el aluminio, mientras su resistencia se aproxima o iguala la de éstos. El CR-39TM se desarrolló para competir con el vidrio ya que tiene una densidad de cerca de la mitad de la del vidrio. Este plástico es un práctico sustituto del vidrio en la fabricación de lentes de seguridad para uso industrial porque combina su peso ligero con una alta resistencia al impacto y es superior al acrílico en la resistencia al uso.

La *gravedad específica* de los plásticos está en el rango de 0.06 para los espumados a por encima de 2 para los fluorocarbonos, comparados con 0.5 para maderas suaves, 0.7 para maderas duras, de 2.2 a 4 para vidrios y cerámicos, cerca de 3 para los aluminios y alrededor de 8 para los aceros.

1.2.3 Propiedades mecánicas

Son las propiedades mostradas cuando una fuerza es aplicada al material. Usualmente se relacionan al comportamiento elástico o inelástico del material, y normalmente requieren de la destrucción de una muestra para medirse. La dureza es una propiedad mecánica porque su medición implica el rayar o el aplicar una fuerza a través de un pequeño penetrador. Esto es considerado destructivo pues una ralladura o una indentación pueden destruir una parte del material para alguna aplicación. El término "mecánicas" es aplicado a estas propiedades debido a que son normalmente usadas para indicar la conveniencia de usar un material en aplicaciones mecánicas, en partes que soportan una carga, absorben choques, resisten al uso, etc.

Las variaciones en las propiedades son obtenidas a través de las variaciones del peso molecular y la cristalinidad. Con las propiedades mecánicas, un incremento en la cristalinidad o la densidad, más un incremento en el peso molecular, produce los correspondientes incrementos en la resistencia a la tensión, dureza, y resistencia a la flexión, pero disminuye la resistencia al impacto y el porcentaje de elongación. Aditivos, llenadores y refuerzos también cambian las propiedades mecánicas en gran medida.

Debido a las variedades disponibles dentro del mismo grupo de plásticos, existe un amplio rango de la *resistencia a la tensión* para los plásticos de ese grupo. Por ejemplo, hay resinas epóxicas que tienen una resistencia a la tensión tan baja como 10MPa y otras que exceden los 100MPa. Muchos plásticos pierden rápidamente su resistencia a relativamente bajas temperaturas (20°C) mientras que otros, como las poliamidas, pueden mantener su resistencia cerca de los 500°C durante pequeños periodos de tiempo. Otros materiales de ingeniería tienen mayores resistencias que los plásticos, pero la baja densidad de éstos logra una competitiva relación entre resistencia y peso. Se usa la *resistencia específica (specific strength)* como punto de comparación. *resistencia específica (m)* = resistencia a la tensión/densidad; plásticos reforzados con fibras (FRP), tienen resistencias específicas alrededor de 35,000 m mientras que el acero inoxidable tiene una resistencia específica de alrededor de 25.000 m.

Los plásticos comparados con el acero y otros materiales de ingeniería, son mucho más suaves. Las pruebas de *dureza* en los plásticos más comunes son hechas con los durómetros Shore A y D y el Rockwell M. El problema con las pruebas de dureza es que los valores obtenidos no se acercan mucho a la resistencia al uso y la abrasión como la mayoría de los materiales lo hacen: el poliestireno tiene una dureza Rockwell M de 72 pero se raya fácilmente; el CR-39 tiene una dureza Rockwell M de 95 a 100 pero tiene una resistencia a la

abrasión aproximadamente igual a la del vidrio. El metil metacrilato (acrílico) tiene una dureza promedio de R_M 93 a 98 pero su resistencia a la abrasión es 30 a 40 veces menor que la del CR-39. La resistencia a la abrasión y al uso son medidas por la prueba Taber y otras que determinan el porcentaje de pérdida de claridad debido a marcas, o el porcentaje de pérdida de material debido a la fricción con abrasivos como el óxido de aluminio.

La *tenacidad* o *resistencia al impacto* es generalmente mejor en termoplásticos que en termofijos. El policarbonato tiene la mayor resistencia al impacto de los plásticos transparentes con un valor de 12 a 14 ft-lb/in mientras que el poliestireno tiene 10.4 ft-lb/in, el acrílico 0.8 a 1.6 ft-lb/in y el poliuretano de 5 a 8 ft-lb/in. Los valores anteriores se obtuvieron con especímenes que tenían una pequeña muesca. Las muescas en la mayoría de los plásticos limitan severamente su tenacidad, así que el diseñador debe evitar esquinas afiladas o condiciones en las cuales las partes puedan sufrir roturas o ralladuras.

1.2.4 Propiedades dimensionales

No se listan en manuales, y no son una categoría legítima en la mayoría de las normas. Sin embargo, el tamaño disponible, la forma, el acabado, y las tolerancias en los materiales son comúnmente los factores de selección más importantes. La aspereza de una superficie es una propiedad dimensional, ésta es medible e importante para muchas aplicaciones. Como se verá más adelante estas propiedades fueron fundamentales en la selección del plástico.

1.3 Selección del plástico a utilizar

Las características que debe tener el plástico con el que se fabricará la superficie reflejante pueden resumirse en las siguientes:

- Excelentes propiedades ópticas.
- Excelente resistencia al clima y larga duración.
- Excelente aptitud para el metalizado.
- Disponibilidad en el mercado.
- Bajo costo.

Los materiales plásticos con los que se han obtenido mejores resultados en el campo de la energía solar son: lexan (policarbonato), plexiglas (acrílico), teflón (fluorocarbono) y mylar (poliester). La mica de PVC es un material muy barato y disponible en el mercado, razones por las que se estudiarán sus características. Así el estudio de las propiedades específicas de los plásticos se reduce a los cinco materiales antes citados.

Lexan: Policarbonato (PC)

El policarbonato[5] es un termoplástico, el cual es uno de los más tenaces y versátiles polímeros utilizados en ingeniería.

Cuando dos o más materiales con diferentes coeficientes de dilatación son utilizados en un ensamble común, el esfuerzo térmico puede convertirse en un factor importante en el análisis de esfuerzos. Por esta razón, los efectos del esfuerzo térmico deben ser considerados en el diseño de partes de policarbonato que se incorporan a ensambles muy ajustados o que llevan tornillos. Esto es

especialmente importante cuando el ensamble se hace a otra temperatura diferente a aquella de uso final.

El policarbonato es generalmente estable al agua, minerales y ácidos orgánicos. Sin embargo, puede ocurrir que una parte moldeada de policarbonato que esté sometida a un gran esfuerzo y sea expuesta al agua o humedad, en un ambiente a elevada temperatura, se vuelva quebradiza. Por esta razón, la temperatura límite recomendada es de 60-71°C. La resistencia a la tensión y a la flexión disminuyen constantemente conforme aumenta la temperatura. Por otro lado, el efecto de la temperatura es opuesto para la resistencia al impacto. A medida que la temperatura disminuye, el material se vuelve más duro y quebradizo.

Cuando se trabaja con resinas de policarbonato en situaciones a largo plazo se requiere evaluar el fenómeno de deslizamiento (*creep*). El punto en el cual este fenómeno toma importancia es llamado límite de deslizamiento (*creep limit*) del material. En el caso del policarbonato a 23°C este valor es cerca de 14 MPa, uno de los más altos límites para termoplásticos no reforzados.

Los plásticos, como todos los materiales, son susceptibles de degradación debido a los efectos del ambiente, sin embargo, el policarbonato ha obtenido buenos resultados, particularmente en lo que se refiere a la retención de sus propiedades mecánicas. Pero se recomienda el uso de un material estabilizador de la radiación ultravioleta.

El policarbonato es utilizado para componentes de puertas y ventanas, en tuberías y muebles, en productos eléctricos y de electrónica, en las partes internas de impresoras, copiadoras, terminales y otros equipos de computación,

así como conectores de teléfono, tabletas de circuitos y otros componentes industriales.

Se han desarrollado láminas de policarbonato especiales para mercados como el de seguridad, agricultura, solar y artes gráficas. También ofrece potencial en cintas, metalizado y empaquetado.

Plexiglas: Poli(metil metacrilato) (PMMA)

Existen muchos tipos de polímeros acrílicos, pero uno de los más importantes es el poli(metil metacrilato), comúnmente conocido como acrílico, el cual es un termoplástico.

La temperatura de trabajo para los acrílicos comerciales va de 66 a 104°C. El agua hirviendo deforma al PMMA. A bajas temperaturas pierde algo de su tenacidad, pero permanece lo suficientemente alto a temperaturas tan bajas como -40°C. Debido a que su coeficiente de dilatación térmico es mayor que el de los metales, cuando se use con éstos, no debe fijarse rígidamente si se espera una alta fluctuación de la temperatura. También pueden existir cambios en las dimensiones si existe un cambio en la humedad. Es un buen aislante térmico, su conductividad térmica es menor que la del vidrio.

Las partes hechas de acrílico son fuertes y rígidas. Los esfuerzos a la ruptura, a compresión y a flexión son mayores que los del policarbonato y más del doble que los del polietileno de alta densidad. Los acrílicos no modificados son quebradizos. Su elongación es del 5 al 9% antes de romperse.

El PMMA transmite el 92% de la luz, aproximadamente el 4% es reflejado, y absorbe menos de 0.5%/in de espesor. No absorbe mucha luz ultravioleta, lo que explica su alto grado de estabilidad respecto a la luz. Prácticamente no es afectado por el clima.

Algunas de las aplicaciones típicas del acrílico son: reemplazar al vidrio, señales, lentes de seguridad, en invernaderos, espejos, ventanas de aviones, muebles, partes eléctricas, etc.

Algunas de sus desventajas son: carencia de resistencia a la abrasión (comparada a la del vidrio), flamabilidad, vulnerabilidad al ataque de ciertos químicos, limitadas características al soportar una carga por mucho tiempo, temperatura de servicio de 93°C y disminuye al soportar una carga, y es sensible a las muescas.

Teflón: (FEP)

El FEP[6] pertenece a la familia de los plásticos fluorados, algunas de sus propiedades sobresalientes son las químicas, eléctricas, térmicas y físicas. Los fluoroplásticos son inertes a casi todos los químicos y solventes, no son flamables, tienen una temperatura de servicio continua de -254 a 250°C, y son termoformables. Tienen la propiedad única de no adhesión y bajos índices de fricción. Transmiten más luz y radiación UV que los vidrios y tienen una muy buena resistencia al clima.

Mylar: Poli(etileno tereftalato) (PET) (PETP)

El poliéster[5] termoplástico más utilizado es el PET. El uso de éste se incrementa rápidamente en textiles, empaçado, cintas de audio y video, aplicaciones en ingeniería, cubierta de cables, etc.

El punto de fusión del PET es de 254°C. Es conocido por su claridad y tenacidad cuando es utilizado para la manufactura de láminas o botellas.

Es un plástico muy versátil debido a sus excelentes propiedades físicas y a que puede convertirse en productos finales amorfos o semicristalinos. Su sobresaliente estabilidad dimensional se obtiene controlando su orientación y fijando el calentamiento durante su procesamiento. Pocos materiales ofrecen un rango tan amplio de variables en su procesamiento y en sus propiedades.

Las láminas de poliéster[7] son manufacturadas por extrusión; la mayoría son orientadas biaxialmente y producidas en forma plana; solo una pequeña parte es hecha tubo. Las láminas de PET son hechas en espesores que van de 1 a 350 μm y su apariencia varía de translúcidas a transparentes dependiendo de su uso final. Se les puede agregar pigmentos para colorearlas.

Estas láminas son utilizadas en artes gráficas y también son apropiadas para el metalizado por vaporización sin que necesiten un tratamiento previo especial. Actualmente son empleadas como material para empaçar, como dieléctricos y aislantes eléctricos, como base en películas fotográficas y circuitos impresos flexibles, y como películas decorativas. En años recientes han ganado importancia en la manufactura de videocintas.

Poli(vinil clorado) (PVC)

Las propiedades físicas y químicas del PVC[5] son ampliamente modificadas por la cantidad y el tipo de plastificantes, modificadores y otros aditivos que contiene. Algunas formulaciones contienen hasta el 39% de aditivos. El proceso de manufactura también modifica las propiedades físicas y mecánicas.

La utilidad del PVC está limitada por su pobre estabilidad térmica, poca resistencia a muchos tipos de solventes, oxidación por compuestos de azufre, y una resistencia a la cedencia comparativamente baja por libra de material.

Debido al plastificante que contiene el PVC[8], con frecuencia produce dificultades para el metalizado. El plastificante no ha de ser volátil a temperatura normal en un vacío de 10^{-4} Torr. Algunos plastificantes tienden a "migrar" en el posterior lacado y exudan en la superficie. De este modo se producen zonas pegajosas y ciegas tras el vaporizado.

En la tabla I.1 se presentan las principales características físicas, mecánicas, químicas, ópticas y de servicio de los materiales antes analizados.

Tabla 1.1 Propiedades de cinco diferentes plásticos

	FEP(reflon)	POLICARBONATO	PET(mylar)	PMMA(acrílico)	PVC
Temp max de serv °C	249	132	149	77	79
Temp min de serv °C	-254	-101	-79		-46
Flamabilidad cm/s	nil	3	2.5	3	nil
Cond termica kW/(m ² K)	2.5	1.9	1.5	1.0-2.2	1.3-1.7
Cedencia m ² /(kg*mm)	15.5	27.7	23.8-27.1	28.1	24-27.6
Gravedad especifica	2.15	1.2	1.38-1.41	1.18-1.19	1.2-1.8
Esfuerzo a tension MPa	17.0-21.1	59.1-01.9	281 [#]	57.7-61.9	98.4-112.5
Elongacion %a	300	85-105	50 [#]	4-12	100-500
Resist al rasgado(σ _{tear}) g/mm	125	7.0-9.8	4.7-10.6		60-1400
Resist al impacto MPa	2-15 ^e	04-06 ^d	25-30 ^e	37 ^d	12-20 ^e
Dureza	D60 ^f	M70-100	M94-101	M35-95	A50-100 ^f
Absorcion de agua %en 24h	<0.01	0.1	0.03-0.05	0.3-0.5	
Resist acidos fuertes	B	B	B	B	B
Resist alcalinos fuertes	B	R	R	B	B
Resist grasas	B	B	B	R	B
Resist solventes organicos	B	B	B	R	B
Indice de refraccion	1.34	1.59	1.64-1.67	1.49	1.53
Transmitancia energ solar %a (onda corta)	90	85-91	80-87	92	76-82
Transmitancia infrarrojo %a (onda larga)	25.6	2	17.8	2	
Falta de claridad(haze)%a	4	0.5-2	2	1	8-18
Const dielectrica kHz	2.25	2.9	2.8	3.75	4-8
Resist dielectrica kV/mm	276	59	296	16	10-39
Resistividad Ohm cm	10 ¹⁹	10 ¹⁶	10 ¹⁸	10 ¹⁵	10 ¹¹ -10 ¹⁴
Estabilidad dimensional a 100 C %a cambio	<1	nil	<0.5		-7a15
Resist a radiacion UV	B	R	R	B	B
Encogimiento por calor (mermat shrinkage)%a	no	no	si	no	si

^d Prueba Izod, barra de 2.5X2.5 cm con muesca.(N*m)/m.

^e Impacto con péndulo, especimen de 3.2 mm, kg/cm.

^f Dureza Shore.

[#] Tensado(*ensilized*).

MB=muy buena, B=buena, R=regular.

Un aspecto importante es la disponibilidad en el espesor adecuado y el costo del material. Por ejemplo, el teflón con acabado transparente no lo comercializan en México; con el acrílico sucede que no se consigue en espesores menores a 1.5 mm. En la tabla 1.2 se muestran estas características.

TABLA 1.2 Características de presentación de los plásticos analizados

	FEPTeflon)	POLICARBONATO	PET(mylar)	PMMA(acrílico)	PVC
*Costo \$ m ²	375.67	309.83	25.02	127.31	12.14
Espesor mm	0.793	3	0.254	1.5	0.254
Transparencia	translucido(bico)	total	total	total	total
Se vende por	lam 48"X48"	lam 1.22mX2.44m	rollo 1.4mX30m	lam 1.2mX1.8m	por m X .56m

*Estos precios no incluyen IVA, actualizados en feb. 15 de 1996.

Como se puede apreciar del análisis anterior no hay ningún material que satisfaga todas las características deseadas para la superficie del colector solar; sin embargo, algunos se acercan mucho como se puede apreciar en la tabla 1.3 que resume las dos anteriores.

TABLA 1.3 Principales características para la selección del plástico

	FEP(teflon)	POLICARBONATO	PET(mylar)	PMMA(acrílico)	PVC
Temp max de serv °C	249	132	149	77	79
Índice de refracción	1.34	1.59	1.64-1.67	1.49	1.53
Transmitancia energ solar % (onda corta)	90	85-91	80-87	92	76-82
Transmitancia infrarroja % (onda larga)	25.6	2	17.8	2	
Durabilidad y resist al clima	Aceptable-bueno	Deficiente-bueno	Aceptable-bueno	Regular-bueno	Deficiente-bueno
Adherencia del vaporizado	B	MB	MB	R	R
*Costo \$ m ²	375.67	309.83	25.02	127.31	12.14
Espesor mm	0.793	3	0.254	1.5	0.254

En resumen:

FEP(teflón) .- Ventajas: Tiene excelentes propiedades físicas, mecánicas, químicas y ópticas.

Desventajas: Costo muy elevado e imposible de conseguir transparente.

Policarbonato .- Ventajas: Resistente al clima, alta resistencia al impacto y excelente aptitud para el metalizado.

Dentajas: Costo muy elevado y no se encuentra en espesores menores a 3 mm.

PET(mylar) .- Ventajas: Bajo costo, excelente aptitud para el metalizado, estabilidad dimensional y sus propiedades ópticas aunque no son excelentes son muy aceptables.

Desventajas: Para espesores arriba de 0.254 mm se vuelve translúcido, es atacado por la radiación UV y es difícil de conseguir en pequeñas cantidades.

PMMA(acrílico) .- Ventajas: Tiene las mejores propiedades físicas, mecánicas, químicas y ópticas, excelente resistencia al clima y costo moderado.

Desventajas: No se consigue en espesores menores a 1.5 mm y la adherencia del vaporizado es moderada.

PVC .- Ventajas: Muy bajo costo y fácil de conseguir en espesores de 0.0254 a 0.508 mm.

Desventajas: Baja transmitancia y mal acabado, poca estabilidad dimensional, regular aptitud para el metalizado y para el clima.

En conclusión creo que el material que más se acerca a nuestras necesidades es el mylar(PET), por su balance entre propiedades, espesor disponible y costo. Sin embargo se continuarán analizando los otros plásticos para tener más puntos de comparación.

1.4 Búsqueda del material

El mylar es fabricado por la compañía Dupont. El principal uso que se le da en México es para el aislamiento en las partes internas de los motores eléctricos y en la industria de las artes gráficas.

En la industria eléctrica los espesores en los que se utiliza el mylar, son tales, que es totalmente opaco. Por lo que el buscarlo en casas de material eléctrico no tiene sentido para nosotros.

En la industria de artes gráficas sí lo utilizan en espesores en los que es transparente, pero la mayoría de estos espesores son muy delgados por lo que se dificulta encontrarlo. Otro problema que ya mencioné es que en casi todos los lugares lo venden en rollos de 30 m. En el anexo A indico un par de lugares donde lo venden en espesores adecuados y en pocas cantidades.

CAPITULO II

Desarrollo del proceso de metalizado

El metalizado es el proceso mediante el cual se coloca una fina capa de algún metal altamente reflejante sobre la superficie plástica, con el fin de crear el espejo que reflejará los rayos solares hacia el tubo absorbedor del colector.

2.1 Tipos de metalizado

Los principales métodos para la metalización [9] de materiales plásticos, y otros materiales no conductores, comprenden cinco clasificaciones generales.

Cada una presenta sus ventajas y desventajas dependientes del tamaño y forma de las piezas, espesor del recubrimiento necesario y empleo definitivo de la pieza recubierta. La debida selección del método utilizado es de la máxima importancia a fin de conseguir las mayores ventajas.

Actualmente, la clasificación comprende:

- A) Método de reducción química.
- B) Método de recubrimiento especular por pulverización.
- C) Método por evaporación del metal en alto vacío.
- D) Rocío de metal.
- E) Recubrimiento electrolítico.

Este último procedimiento requiere antes de su aplicación que las superficies de la pieza no metálica sea conductora, condición que se consigue generalmente aplicando un débil recubrimiento por los procedimientos A o B, o también, aunque actualmente ya está en desuso, por la escasa adherencia conseguida, recubriendo la superficie con grafito o con purpurina de bronce, cobre o plata.

Este procedimiento no puede ser utilizado en la construcción de espejos ya que para aplicar los métodos A o B es necesario deslustrar el material, con lo que se le da un acabado mate a la superficie.

El método D) es un proceso[10] mediante el cual los metales se funden en una pistola especial y se rocían sobre la superficie del plástico, donde se

enfrian y forman una corteza metálica. Este proceso presenta un gran número de dificultades y sería una ardua labor reproducir acabados altamente lustrosos, como por ejemplo, los de cromo y plata brillantes. Asimismo, no es adecuado para la aplicación de una cubierta inicial sobre el plástico, previa al electrometalizado, ya que, la estructura burda y granulada del depósito, produce una superficie áspera, pues se haría necesario un excesivo lustrado físico para obtener un acabado de buena calidad.

Este proceso puede utilizarse para electroformado, particularmente después del electrometalizado, ya que se puede depositar rápidamente por este medio una sección metálica gruesa.

El método A) se utiliza principalmente como método previo para conseguir la necesaria conductibilidad para el método electrolítico, pero también permite la obtención de recubrimientos gruesos y muy uniformes de níquel por el procedimiento "electroless níquel". El método es posible con material plástico termoestable; no obstante también pueden recubrirse algunos materiales termoplásticos aunque con precaución a causa de su inestabilidad a la temperatura. Estos métodos también comprenden el plateado, por reducción de una solución amoniacal de plata, el cobreado por reducción mediante formaldehído de una solución de Feheling. Antes de aplicar cualquiera de los métodos indicados debe procederse al precondicionamiento, sensibilizado y activado de la superficie.

El tratamiento para precondicionar la superficie, varía con el tipo de proceso y el material que se está procesando, pero el desengrasado y deslustrado son imprescindibles. El desengrasado puede efectuarse colocando los artículos en una tina que contiene un desengrasante apropiado. El deslustrado se efectúa por rotación de los artículos en un barril que contenga polvo de pómez. Los artículos

deben estar bien lavados antes del deslustrado. Cuando los artículos han sido apropiadamente deslustrados, presentan un acabado mate y uniforme.

El depósito de plata, generalmente no tiene una buena adherencia al plástico, a no ser por el tratamiento físico dado en el deslustrado; y es precisamente en esta parte del proceso donde la superficie adquiere un acabado mate y áspero lo que hace que este procedimiento no se pueda utilizar en la construcción de espejos de segunda superficie.

El método C) es uno de los más importantes procedimientos de metalizado[8] para plásticos. Los plásticos vaporizados se han impuesto en muchas aplicaciones, en particular porque no solamente ofrecen ventajas tecnológicas, sino también porque pueden recubrirse con finas capas de metales u óxidos, en forma extraordinariamente rentable, piezas con formas muy diversas.

Este es un proceso en el cual se obtiene una cubierta metálica extremadamente delgada, generalmente de aluminio, el cual se vaporiza dentro de una cámara al vacío y se deposita sobre la superficie del material plástico. De este modo, una pequeña pieza de aluminio, es capaz de cubrir una gran superficie y, por consiguiente, resulta sumamente económico el precio de materia prima. En contraste con esto aparece el alto costo del equipo.

2.2 Selección del proceso de metalizado

Como puede observarse no todos los procedimientos para metalizar plásticos son aplicables en la construcción de espejos, debido a que al preacondicionar el material a metalizar, éste es modificado (deslustrado) en su superficie para que el metal tenga una buena adherencia. Esta modificación da un acabado mate al plástico, lo que, lógicamente, lo hace inapropiado en la construcción de espejos.

Por otro lado si la capa metálica se expone directamente, es decir, en la parte anterior del espejo, aún cuando esté protegida con una laca su duración sería muy corta debido a los efectos del clima. La adherencia es afectada seriamente por la humedad, además si en el espejo se hacen agujeros[11] para montarlo a la estructura que le da la forma de parábola se crean zonas de concentración de esfuerzos que son las fuentes de propagación de fracturas cuando hay dilatación térmica , tanto en el plástico como en la capa metálica .

El procedimiento de vaporizado al alto vacío no requiere del deslustrado ni de ningún otro tratamiento previo salvo de una perfecta limpieza, es muy utilizado por su rentabilidad y por los resultados obtenidos en cuanto a adherencia y brillo metálico. Este fue el procedimiento utilizado por las empresas que realizaron el metalizado de los diferentes plásticos.

2.3 Desarrollo del proceso de vaporizado en alto vacío

El vaporizado consiste en la separación de precipitados en capa fina sobre una base, a partir de la fase vapor.

Todas las materias --elementos puros, por ejemplo metales, como también compuestos, particularmente óxidos-- pueden ser sólidas, líquidas o gaseosas. Su estado en un momento dado depende de la temperatura y de la presión. Mientras que el paso de sólido a líquido apenas es influido por la presión del aire, la transición hacia el estado gaseoso es dependiente de la presión. De ello puede deducirse que la vaporización resulta impedida por el aire presente. En consecuencia, en una cámara vacía de aire pueden producirse con menor energía grandes cantidades de vapor, no mezcladas con gases residuales.

El material a vaporizar se calienta en un crisol apropiado hasta que se transforma en vapor en cantidad suficiente, es decir, hasta que alcanza la presión de vapor necesaria o bien la velocidad de vaporización indispensable. Los átomos vaporizados abandonan la superficie con una velocidad de vuelo de varios cientos de metros por segundo. El movimiento ocurre en línea recta hasta que chocan con un obstáculo (pared del recipiente, substrato o gases residuales). A base de la presión en la caldera de vacío puede calcularse el número de moléculas de gas residual presentes.

El alto vacío es pues indispensable para una expansión en línea recta del vapor, ya que los choques con gases residuales conducen a reacciones indeseadas, que limitan o impiden el brillo metálico. La presión de gas residual debiera situarse, por tanto, en el vaporizado de plásticos con aluminio, a unos 10^{-4} Torr. La longitud media de camino libre λ depende del tipo de gas y de la temperatura; para aire, oxígeno, nitrógeno y argón a una presión de 10^{-4} Torr es de 50 cm aproximadamente.

En la práctica, el vacío en la vaporización de metales es a menudo mejor, pues el metal que vaporiza ejerce una ligazón del gas residual, lo que puede compararse con un efecto de bombeo. Con ello desciende la presión hasta

unos 5×10^{-5} Torr. y con ello se eleva el porcentaje de partículas que llegan sin choque.

En general solamente pueden aportarse capas relativamente finas por vaporizado sobre la superficie del plástico. La capa vaporizada reproduce hasta el mínimo detalle la superficie de las piezas tratadas. Las superficies ásperas tienen un aspecto mate, las superficies brillantes se convierten en espejos. Por medio del vaporizado en alto vacío puede precipitarse básicamente una gran cantidad de metales y compuestos en capa fina. Sin embargo, en la práctica se vaporiza predominantemente aluminio, con el que pueden obtenerse capas duraderas, con claro brillo plateado. Mediante otros procedimientos, el aluminio no puede aplicarse como revestimiento de superficies, o sólo en malas condiciones.

El vaporizado propiamente dicho solamente dura algunos segundos con ciertos metales, una vez alcanzado el vacío indispensable. Los átomos de vapor condensan sobre las piezas a recubrir, pero también sobre todos los elementos de la cámara de vacío y sobre su pared interior. La temperatura de las piezas de plástico se mantiene tan reducida durante el vaporizado que queda prácticamente excluida una deformación de las materias termoplásticas. La combustión u oxidación del material a evaporar es imposible, debido a la ausencia de oxígeno. El espesor de las capas vaporizadas, que en casi todos los casos es inferior a 1μ m, puede regularse con la duración y temperatura del vaporizado. La capa ópticamente hermética usual en la práctica tiene aproximadamente 0.3μ m de espesor.

Tras el correspondiente tratamiento previo, las piezas a vaporizar se introducen en la cámara por medio de una jaula de alimentación. A continuación se cierra la cámara con respecto a la atmósfera y se hace el vacío. Para mejorar la

adherencia se produce algunas veces una descarga intensiva de efluvios a unos 10^{-1} Torr antes del vaporizado. Con la tensión aplicada para ello se desprenden de un electrodo iones y electrones, que llegan hasta la superficie a vaporizar. El electrodo se fabrica con un material de difícil pulverización, casi siempre aluminio. Los tiempos de descarga son muy diversos, oscilando según el tipo de plástico entre 1 y 10 minutos. El efecto de limpieza y mejora de adherencia conseguido con la descarga se debe a varias causas:

- 1.- Las partículas que chocan arrancan restos de gas y agua, de modo que pueden extraerse con la bomba.
- 2.- Las piezas se calientan.
- 3.- Con el choque de los iones se arrancan átomos de la superficie de las piezas, por lo que éstas resultan ligeramente asperizadas y las capas vaporizadas adquieren mejor adherencia, sin pérdida de brillo.
- 4.- El bombardeo de electrones e iones forma gérmenes para la posterior condensación de la capa.

Efectuada la limpieza por efluvios y hasta alcanzar el vacío de trabajo de unos 10^{-4} Torr, necesario para el vaporizado, se sigue evacuando. Una vez alcanzado el vacío necesario, se inicia la rotación de la jaula de alimentación. El material a aplicar se calienta hasta que vaporiza y se condensa sobre las piezas. Con ello termina el proceso de vaporizado; se airea la instalación y se extraen las piezas vaporizadas de la cámara. La cámara está dispuesta para un nuevo ciclo.

2.3.1 Instalaciones para el vaporizado de piezas de plástico al vacío

Para el vaporizado de plásticos se utilizan instalaciones con eje de la cámara horizontal, para conseguir un favorable aprovechamiento del espacio. La

figura 2.1 muestra el esquema de una instalación de vaporizado de plástico con el juego de bombas de alto vacío corriente actualmente y las correspondientes válvulas. Como puede verse, el juego de bombas consta de una bomba previa del tipo de émbolo rotativo, una bomba Roots y una bomba de difusión. Al elegir la bomba de difusión hay que tener en cuenta que se han de bombear cantidades importantes de vapor, debido a la cantidad de gas relativamente grande que desprenden los plásticos. Como el proceso de bombeo ha de ser lo más corto posible por razones económicas, las bombas de difusión no sólo han de tener la máxima capacidad de aspiración, sino también un buen efecto de fraccionamiento. En consecuencia, se preferirán las bombas de difusión de aceite de cuatro etapas a las de tres.

Las instalaciones modernas están equipadas, además, con una trampa de nitrógeno líquido, accionada con dicho elemento a -190°C . Esta trampa, además del vapor de agua, elimina también todos los gases y vapores condensables, liberados por desorción de las superficies. De este modo se consigue una drástica reducción del tiempo de evacuación.

Las bombas y válvulas son controladas automáticamente en casi todas las instalaciones de construcción moderna. Organos de conmutación controlados de acuerdo con la presión, tiempo o temperatura, cuidan de un trabajo correcto y seguro en todo el proceso de bombeo. Además se construyen instalaciones en las que el automatismo del programa se ha ampliado de tal modo que también transcurren automáticamente el vaporizado y el proceso de descarga catódica. En estas condiciones, el resultado queda prácticamente independiente del personal de servicio; la calidad de las piezas vaporizadas es siempre uniforme y la cantidad de piezas defectuosas muy reducida.

Las instalaciones de vaporizado para plásticos han de producir un movimiento planetario de las piezas con respecto a las fuentes de vaporización. Sólo entonces pueden obtenerse capas uniformes sobre cuerpos tridimensionales. Los soportes utilizados para la fijación de las piezas pueden colocarse por separado en estas jaulas. En el vaporizado se efectúa el giro tanto de las jaulas como de los correspondientes soportes. Esta medida permite aprovechar en forma favorable la cámara de alto vacío, y además se cumplen todas las exigencias para el vaporizado de piezas tridimensionales. Los elementos de vaporización están dispuestos en la línea central de la jaula de carga. Si sólo hay que vaporizar piezas relativamente planas, como por ejemplo placas o espejos, puede prescindirse de la doble rotación. En este caso gira solamente la jaula de carga, provista de las piezas, alrededor del eje central, pasando las mismas frente al vaporizador.

- 1 Recipiente
- 2 Vaporizador
- 3 Bastidor de carga
- 4 Cátodo de descarga
- 5 Mercancía a vaporizar
- 6 Bomba de difusión
- 7 Bomba Roots
- 8 Bomba previa
- 9 Trampa de nitrógeno
- 10 Válvula de alto vacío
- 11 Válvula de bomba previa
- 12 Válvula de desvío
- 13 Válvula de admisión
- 14 Manómetro de alto vacío
- 15 Manómetro de vacío previo

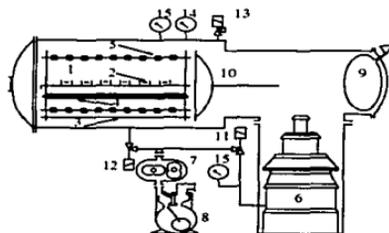


Fig. 2.1 Esquema de una instalación de vaporización de plástico.

2.4 Material y fuentes de vaporizado.

Los materiales apropiados para el vaporizado son el aluminio, plata, cobre, oro, cromo, iridio, molibdeno, paladio, platino y rodio. Los comunmente utilizados son los tres primeros. Entre los óxidos hay que nombrar principalmente el monóxido de silicio. Todas las sustancias para vaporizar tienen que ser lo más puras posibles. Las impurificaciones por cuerpos extraños pueden conducir a fenómenos indeseados, como modificaciones en el color de las capas y menor adherencia. Las aleaciones no son apropiadas para vaporizar, ya que los diversos componentes tienen casi siempre puntos de ebullición diversos y no vaporizan al mismo tiempo. Así, por ejemplo, al vaporizar latón, se separa primero el zinc contenido en la aleación y solamente después el cobre. Si se vaporiza latón sobre una placa de vidrio, la superficie mostrará el tono del cobre y la cara posterior el del zinc.

Para el calentamiento de las sustancias a vaporizar se utilizan generalmente vaporizadores calentados por el paso directo de corriente. En cuanto a material y forma han de estar adecuados al proceso, y presentar un punto de fusión mucho más elevado que el de las sustancias a vaporizar. Además no pueden reaccionar con las sustancias o sólo muy ligeramente, ya que ello tendría efectos desventajosos sobre su duración. Normalmente se utilizan vaporizadores de wolframio, tántalo o molibdeno. Se suministran en forma de barritas, chapas, espirales o crisoles.

En la actualidad se vaporizan generalmente los plásticos con aluminio. Para ello se utiliza preferentemente la espiral de wolframio en las instalaciones de producción, que es hoy la solución más rentable para el vaporizado de

aluminio. Para la carga se cuelgan de la espiral alambres de aluminio en forma de gancho o bien se colocan flejes o alambres en el interior de dicha espiral. Al calentar, se funden estos elementos y mojan las diversas secciones de la espiral.

Si se exige una larga duración de las piezas, es mejor vaporizar aluminio en lugar de plata. Incluso la mejor laca protectora no está totalmente exenta de poros y tampoco es tan resistente a largo plazo como para proteger la fina capa de plata y evitar su ennegrecimiento o cambio de color a consecuencia de las influencias atmosféricas. Aun cuando la plata[12] presenta resistencia a una amplia variedad de agentes corrosivos, se combina fácilmente con el azufre y se mancha de negro de sulfuro de plata. La resistencia de la plata a los halógenos secos es buena; la película de haluro inerte que se forma protege a la plata contra la progresión del ataque. Sin embargo, la humedad destruye la película y favorece el ataque progresivo. El aluminio resiste durante mucho más tiempo. El revestimiento de plata tiene un aspecto amarillento, el de aluminio es azulado.

En la tabla 2.1 se muestra la reflectividad espectral de la plata y del aluminio. Puede observarse que la reflectividad de la plata es superior a la del aluminio, pero debido a factores económicos y de durabilidad es mejor utilizar aluminio.

Las características físicas del aluminio[13] son:

- 1.- Pureza 99.996% (dato obtenido de la empresa que hizo el metalizado).
- 2.- Densidad a 20 °C, 2.6989 g/cm³; a 25 °C, 2.6978 g/cm³
- 3.- Punto de fusión 660.2 °C.
- 4.- Punto de vaporización 2450 °C.

5.- Expansión térmica de -50 a 20 °C, 21.8 micro in-°C/in; 20 a 100 °C, 23.6 micro in-°C/in.

6.- Calor específico a 100 °C, 0.224 cal/g.

7.- Calor latente 94.5 cal/g.

8.- Calor de combustión 7420 cal/g a 25 °C.

9.- Conductividad eléctrica 64.94 % IACS.

10.- Resistividad eléctrica a 20 °C, 2.6548 microhm-cm.

11.- Reflectividad

90 % para luz blanca de un filamento de tungsteno.

86 a 87 % en el rango $\lambda = 2200$ y 2500 Å.

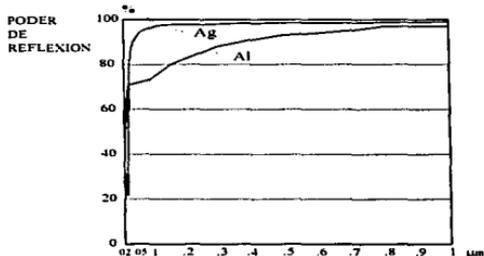
96 % para $\lambda = 10000$ Å (1 micra).

97 % en el rango $\lambda = 11000$ a 100000 Å (1.1 a 10 micras).

12.- Emisividad a 25 °C, 0.030 en aire.

TABLA 2.1. Reflectividad espectral de plata y aluminio para incidencia normal.

LONGITUD DE ONDA μm	REFLECTIVIDAD %	
	PLATA	ALUMINIO
0.4	98.4	91
0.5	98.5	93
0.6	98.6	94
0.7	98.6	95
0.8	98.8	97
0.9	98.9	97
1	99.0	97



2.5 Importancia de las propiedades del plástico para el proceso de vaporizado

Deben utilizarse siempre plásticos de calidad unitaria. En la elaboración de mezclas o regenerados pueden producirse defectos o perturbaciones que solamente pueden notarse en el producto acabado una vez transcurrido algún tiempo. A las bajas presiones necesarias para el vaporizado a alto vacío, los gases y vapores en concentración excesiva dificultan el proceso de vaporizado.

En consecuencia, al determinar la aptitud de los plásticos para el vaporizado, junto a las propiedades mecánicas y técnicas hay que tener en cuenta también la emisión de gas, la desorción de vapor de agua, problemas de limpieza y de condensación de vapores. El material base no es responsable muchas veces del comportamiento de los plásticos; sobre las propiedades de los materiales a

alto vacío influyen mucho más los aditivos, como plastificantes, agentes de lubricación y desmoldeo, así como las cargas que se utilizan en la elaboración.

En la vaporización pueden presentarse también dificultades cuando se utilizan desperdicios recuperados u otros restos en condiciones deficientes. En la tabla 2.2 se resumen las propiedades importantes para el metalizado de diversos plásticos. La adherencia indicada se refiere al metalizado de la superficie pura del plástico, no lacada.

Tabla 2.2 Características de vaporización de los plásticos

	Emisión de gas	Adherencia	Aptitud para el lacado
PMMA	notable	moderada	buena
Policarbonato	baja	muy buena	buena
Poliéster(mylar)	baja	buena	buena
PVC	notable-grande	moderada	mala

Una exigencia fundamental que rige para todas las piezas a vaporizar es la perfecta limpieza. Los restos de aceites y desmoldeantes producen manchas en las capas, adherencia insuficiente o dificultades de distribución en las lacas de base eventualmente necesarias. Por ello es indispensable una limpieza a fondo con un agente especialmente ajustado para el material y el tipo de impureza. También hay que evitar impurezas en la superficie, como por ejemplo el sudor de la mano. Una buena medida de seguridad contra ello es el embalaje de las piezas en bolsas de plástico hasta el momento del lacado previo y metalizado.

Del plástico metalizado se exige en general un alto brillo de espejo con la máxima reflexión. Sin embargo, la lisura de la superficie del material deja siempre algo que desear. Existe siempre una cantidad de poros más o menos grandes y desigualdades. Como la capa vaporizada reproduce en forma submicroscópica la estructuración de la superficie, adquiere un leve aspecto mate.

La fina capa metálica vaporizada precisa a veces de una protección, haciendo necesario un adecuado lacado protector. La laca ha de proteger la capa metálica frente a desgaste mecánico, corrosión e influencias atmosféricas. Por otra parte, no debe perjudicar ni la base, ni la capa vaporizada. Según la aplicación de la pieza metalizada se exige, por ejemplo, resistencia al perfume y otras materias, en parte agresivas, resistencia a climas tropicales, insolubilidad en determinados disolventes, resistencia al calor y a la abrasión, etc. En las piezas que no están sometidas a ningún tipo de esfuerzo, se prescinde muchas veces del lacado protector.

CAPITULO III

Cuantificación de la reflectividad

Para conocer cuál superficie reflejante es la mejor en cuanto a calidad óptica, se mandaron construir muestras con diferentes plásticos; asimismo se trabajó con diferentes proveedores.

Un aspecto muy importante relacionado con estas superficies es su degradación con el paso del tiempo. Lo que se hizo fue medir su reflectividad cuando nuevas y dos meses después.

3.1 Interacción de la radiación electromagnética con la materia

El colector solar[11] que abastece de energía a un sistema, realiza la función de transferir la energía radiante a un fluido u otro medio de trabajo. El flujo de radiación incidente en un colector en la superficie terrestre es en el mejor de los casos 1000 W/m^2 . En los sistemas colectores de enfoque, la energía se concentra por medio de un sistema óptico a través de un espejo o una lente para aumentar el flujo radiante sobre el receptor; así se puede reducir el área del receptor y consecuentemente las pérdidas térmicas, ocasionando un aumento en la temperatura de operación del sistema.

La radiación solar que llega a la Tierra son ondas electromagnéticas que se encuentran en el espectro que va de la luz ultravioleta pasando por la luz visible y hasta la luz infrarroja, es decir, de los 50 nm hasta los 40,000 nm aproximadamente. Esto es importante porque el grado de interacción[14] de las ondas electromagnéticas con la materia depende de su frecuencia y su longitud de onda y de las propiedades características del material. Cuando una radiación de longitud de onda λ , choca con un cuerpo, la radiación incidente puede ser reflejada, absorbida o transmitida. La magnitud de cada uno de estos efectos depende de la longitud de onda de la radiación y de las propiedades de la sustancia. Así el total de la radiación incidente es la suma de estos efectos:

$$A_{\lambda} + T_{\lambda} + R_{\lambda} = 1$$

A_{λ} = fracción de la radiación absorbida.

T_{λ} = fracción de la radiación transmitida.

R_{λ} = fracción de la radiación reflejada.

Se demuestra[15] con la teoría del estado sólido que la energía absorbida se transforma en calor dentro del cuerpo. La radiación transmitida sigue las leyes de la refracción y la reflejada las de la reflexión.

En el caso de aprovechar la energía solar como fuente de energía térmica, nos interesa particularmente la interacción de la materia con ondas electromagnéticas que se encuentran en el espectro de la luz visible, debido a que es en este espectro (de 400 nm a 720 nm) donde se tiene la mayor potencia térmica de la radiación solar.

3.2 Muestras plásticas aluminizadas

En el primer capítulo se estableció cuales son los plásticos más frecuentemente utilizados en el campo de la energía solar, sus ventajas y desventajas. Se concluyó que los cinco más apropiados son: teflón, policarbonato, acrílico, mylar y pvc. Los dos primeros se descartaron; el teflón por su elevado costo e imposibilidad de conseguirlo totalmente transparente, el policarbonato también tiene un elevado costo además de que el espesor mínimo en el que se comercializa es de 3 mm, espesor que lo descarta para poder ser utilizado en colectores solares concentradores debido al esfuerzo que opone para mantener la curva de la parábola.

El acrílico que se utilizó en las muestras fue de 3 mm de espesor y aunque, como en el caso del policarbonato este espesor es muy grueso, se utilizó para tener un punto más de comparación entre los diferentes proveedores, así como para observar su durabilidad y posibles efectos del espesor en la reflectividad.

El mylar parece ser el material con mejores características para ser utilizado en la construcción de este tipo de espejos. Los espesores que se utilizaron fueron de 0.254, 0.125 y 0.076 mm.

El pvc se utilizó debido a que es el material más barato y fácil de conseguir, además si se construyen espejos de primera superficie, sus características ópticas que no son muy buenas posiblemente no tengan importancia. Los espesores utilizados fueron de 0.379 y 0.254 mm.

Las muestras son planas, de 10 X 10 cm y se mandaron fabricar con tres diferentes compañías que operan en la Cd. de México (ver Anexo A). Asimismo unas tienen un lacado protector para poder ser utilizadas como espejos de primera superficie, mientras que otras no lo tienen y serán utilizadas como espejos de segunda superficie. En la tabla 3.1 se identifica cada una de las muestras.

3.3 Equipo para la medición de la reflectividad

La evaluación de este parámetro requiere de equipo especializado, ya que las mediciones se tienen que realizar para radiación con longitudes de onda similares a las que emite el sol. En la figura 3.1 se muestra la distribución espectral de la radiación solar. Existen diferentes dispositivos capaces de simular la radiación solar y medir al mismo tiempo los parámetros ópticos físicos dentro de este espectro.

Desafortunadamente nuestra facultad no cuenta con reflectómetros. Sin embargo, el laboratorio de óptica, cuenta con equipo para generar y medir diversos tipos de ondas electromagnéticas.

Para la medición de la reflectividad se utilizó un fotómetro, en el cual se hizo incidir un rayo laser y se midió su intensidad. Después se hizo incidir el rayo laser sobre las superficies plásticas y se midió la intensidad del rayo reflejado. Así el cociente de la radiación reflejada y la incidente nos da como resultado la reflectividad.

El fotómetro con el que cuenta el laboratorio de óptica es de la marca PASCO[16], modelo 9152B con batería integrada. La unidad contiene una fotocelda de selenio, un amplificador altamente sensitivo y una escala. Tiene seis rangos de sensibilidad y un control para variar la sensibilidad. La sensibilidad es de 1 a 300 luxes. La celda de selenio no tiene una respuesta correcta para todas las fuentes de luz; está calibrada a 2700° K de una lámpara de filamento de tungsteno. Sin embargo, cuando la misma fuente es usada para todas las mediciones el instrumento dará intensidades relativas exactas e intensidades absolutas aproximadas.

El laser utilizado es de la marca PASCO, modelo OS-9171. Su elemento activo es gas He-Ne, es de baja potencia (0.5 mW) clase II BHR. La longitud de onda de este tipo de laser es de 632.8 nm.

3.4 Reflectividad de las muestras aluminizadas

La reflectividad o reflejancia es la razón de la radiación reflejada por un material a la radiación incidente sobre el mismo. Obviamente para conocer esta razón es necesario conocer las magnitudes de la radiación incidente y la reflejada. Para esto se utilizó el fotómetro.

Como ya se dijo al inicio de este capítulo la magnitud de la reflectividad depende de la longitud de onda de la radiación y de la naturaleza del material; también se dijo que el espectro en el que nos interesa conocerla es en el de la luz visible, pero al no contar con el equipo necesario para tal propósito, se optó por un rayo laser. Una característica fundamental de los rayos laser es que emiten una luz monocromática y no un espectro: por lo que la reflectividad obtenida será específica para la longitud de onda que emite el laser utilizado, que en este caso es de 632.8 nm.

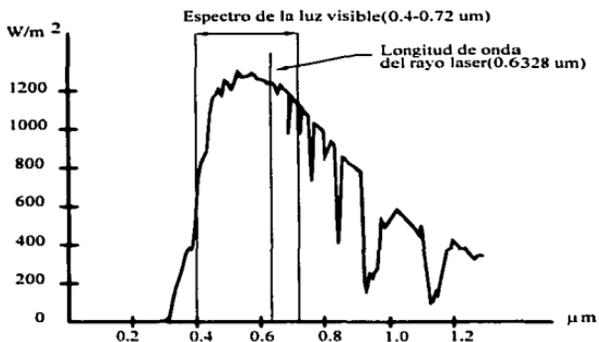
Considero que el utilizar una fuente monocromática es correcto para los alcances de este trabajo debido a que la longitud de onda utilizada está dentro del espectro de la luz visible (ver fig. 3.1) y como puede observarse en la tabla 2.1, la reflectividad del aluminio no varía más allá de 4 % dentro del espectro de la luz visible y además no existen cambios bruscos en su comportamiento; el caso de los plásticos es similar. En el Anexo B se muestran las gráficas de reflectividad para algunos plásticos.

La reflectividad también se ve afectada por el ángulo de incidencia, por lo que se decidió variarlo. El ángulo de incidencia es el que se forma entre la normal a la superficie y el rayo incidente. Los ángulos de incidencia del rayo fueron de 15°, 30°, 45°, 60° y 75°.

En la figura 3.2 se muestra la manera en que se colocó el equipo para hacer las mediciones.

Los resultados obtenidos del experimento para muestras nuevas están contenidos en la tabla 3.2. En la tabla 3.3 se muestran los valores de la reflejancia después de que las muestras fueron expuestas durante dos meses al exterior. Antes de medir su reflectividad, las muestras fueron lavadas en una solución jabonosa y enjuagadas con abundante agua. En la tabla 3.4 se muestran los resultados de las muestras de segunda superficie después de haber sido expuestas durante dos meses, lavadas y enjuagadas; además, fueron limpiadas con un protector abrillantador para plásticos; este producto es muy económico y fácil de encontrar en los supermercados.

Distribución espectral de la radiación solar (AM 1.5)



Henry Curtis
Terrestrial photovoltaic measurement procedures
ERDA/NASA/1022-77/16, NASA TM 73702
NASA-Lewis Research Center, Cleveland, Ohio 44134(1977)

Fig. 3.1 Radiación solar.

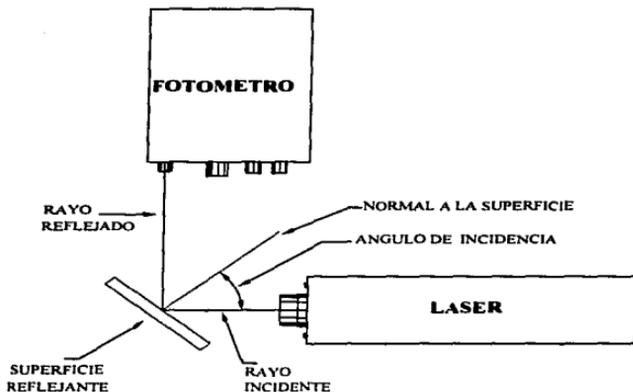


Fig. 3.2 Disposición el equipo para medir la reflectancia.

De los resultados obtenidos podemos concluir:

- 1.- En general la calidad obtenida para todas las muestras por los diferentes proveedores es similar.
- 2.- La diferencia que hay en la reflectancia entre muestras iguales considero que se debe a lo rayado del plástico.
- 3.- Las más altas reflectancias se obtuvieron para espejos de primera superficie; pero las mejores reflectancias de espejos de segunda superficie sólo son menores en alrededor de 5 % cuando las muestras eran nuevas. Pasados 2 meses los espejos de la superficie quedaron inservibles debido a que la superficie

reflejante se desprendió debido a los efectos atmosféricos. Hasta el momento la única muestra de la superficie que casi no se ha degradado es la no. 15, pero con el tiempo seguramente se verá muy afectada.

4.- La reflectividad parece no afectarse por la diferencia de espesores en las muestras de mylar, no así en las de pvc.

5.- Las más bajas reflejancias se obtuvieron para el pvc de 0.379 mm y para el mylar de 0.076, ambas muestras son de segunda superficie. En el caso del pvc, desde nuevo viene con muy mal acabado. En el caso de la muestra de mylar resulta que estaba muy rayada.

6.- El cuidado al manejar los plásticos para evitar que se rayen es fundamental; la reflejancia puede variar hasta en 10 o 12 %.

7.- El usar un protector abrillantador en las muestras de 2a. superficie quitó un poco lo rayado al plástico, además lo dejó perfectamente limpio, con lo que la reflectividad aumentó un poco.

8.- Considero que un período de dos meses es muy corto para evaluar a fondo la degradación sufrida en las muestras. Sin embargo, los efectos producidos en éstas son suficientes para hacer algunas conclusiones.

Creo que para construir colectores cilindro-parabólicos la mejor opción es el mylar. En cuanto al espesor a utilizar considero que se tienen que hacer más pruebas para poder determinar cuál es el mejor en cuanto a vida útil y costo.

Cabe mencionar que si se construye algún colector concentrador que tenga espejos planos, la mejor opción es el acrílico.

**Tabla 3.1 Identificación de las muestras por proveedor,
tipo de material, espesor y acabado superficial.**

	FABICANTE # 1	FABICANTE # 2	FABICANTE # 3
ACRILICO 3 mm LACA PROTECTORA 1A. SUPERFICIE		1 X	2 X
ACRILICO 3 mm S. LACA 2A. SUPERFICIE		3 X	4 X
MYLAR 0.254 mm LACA PROTECTORA 1A. SUPERFICIE	5-6 X *	7 X	8 X
MYLAR 0.254 mm S. LACA 2A. SUPERFICIE		9 X	10 X
MYLAR 0.125 mm LACA PROTECTORA 1A. SUPERFICIE		11 X	12 X
MYLAR 0.125 mm S. LACA 2A. SUPERFICIE		13 X	14 X
MYLAR 0.076 mm LACA PROTECTORA 1A. SUPERFICIE			15-16 X *
PVC 0.379 mm LACA PROTECTORA 1A. SUPERFICIE	17-18 X *	19 X	20 X
PVC 0.379 mm S. LACA 2A. SUPERFICIE		21 X	22 X
PVC 0.254 mm LACA PROTECTORA 1A. SUPERFICIE		23 X	24 X
PVC 0.254 mm S. LACA 2A. SUPERFICIE		25 X	26 X

* Adicionalmente muestras como estas se utilizaron como espejos de 2a. superficie(6, 16 y 18).

Tabla 3.2 Reflejanancias obtenidas de muestras nuevas de superficies reflejantes con diferentes ángulos de incidencia.

MUESTRA NO / ANGLULO DE INCIDENCIA	15°	30°	45°	60°	75°
1	0.79	0.78	0.79	0.79	0.83
2	0.80	0.78	0.79	0.79	0.83
3	0.79	0.76	0.79	0.79	0.83
4	0.79	0.78	0.79	0.79	0.85
5	0.83	0.79	0.79	0.79	0.83
6	0.78	0.74	0.76	0.76	0.78
7	0.78	0.76	0.78	0.78	0.78
8	0.79	0.76	0.79	0.81	0.85
9	0.78	0.74	0.76	0.78	0.81
10	0.78	0.74	0.76	0.78	0.81
11	0.79	0.74	0.79	0.79	0.83
12	0.81	0.79	0.79	0.81	0.83
13	0.78	0.74	0.76	0.79	0.81
14	0.78	0.76	0.76	0.79	0.81
15	0.80	0.78	0.81	0.86	0.86
16	0.67	0.65	0.65	0.71	0.76
17	0.83	0.79	0.81	0.81	0.85
18	0.69	0.66	0.72	0.72	0.78
19	0.80	0.74	0.76	0.78	0.85
20	0.79	0.74	0.76	0.76	0.85
21	0.69	0.67	0.71	0.74	0.76
22	0.71	0.69	0.71	0.72	0.76
23	0.83	0.79	0.79	0.79	0.85
24	0.74	0.72	0.76	0.78	0.81
25	0.72	0.69	0.72	0.72	0.74
26	0.74	0.69	0.72	0.72	0.76

Las muestras estan numeradas de acuerdo con la tabla 3.1

Tabla 3.3 Reflejancias obtenidas de muestras de superficies reflejantes dos meses después, con diferentes ángulos de incidencia.

MUESTRA NO	15°	30°	45°	60°	75°
1	0.65	0.64	0.65	0.68	0.68
2	0.65	0.63	0.67	0.67	0.68
3	0.78	0.74	0.78	0.79	0.79
4	0.71	0.69	0.72	0.72	0.72
5	0.72	0.71	0.73	0.72	0.72
6	0.73	0.72	0.72	0.73	0.76
7	0.63	0.60	0.63	0.64	0.67
8	0.63	0.59	0.63	0.67	0.67
9	0.69	0.66	0.69	0.76	0.79
10	0.70	0.67	0.71	0.76	0.79
11	0.66	0.65	0.67	0.69	0.71
12	0.67	0.65	0.69	0.69	0.74
13	0.74	0.72	0.75	0.77	0.79
14	0.73	0.72	0.74	0.79	0.79
15	0.78	0.76	0.77	0.85	0.86
16	0.66	0.63	0.65	0.69	0.72
17	0.77	0.74	0.76	0.78	0.78
18	0.65	0.63	0.63	0.69	0.71
19	0.65	0.63	0.64	0.71	0.71
20	0.64	0.64	0.65	0.71	0.72
21	0.58	0.57	0.58	0.66	0.67
22	0.56	0.55	0.56	0.63	0.66
23	0.63	0.60	0.63	0.65	0.68
24	0.49	0.47	0.49	0.49	0.53
25	0.67	0.67	0.67	0.72	0.74
26	0.58	0.55	0.56	0.62	0.65

Las muestras estan numeradas de acuerdo con la tabla 3.1

Tabla 3.4 Reflejancias obtenidas dos meses después. Muestras de 2a. superficie limpiadas con un protector abrillantador.

ANGL O DE INCIDENCIA MUESTRA NO.	15°	30°	45°	60°	75°
3	0.79	0.76	0.79	0.79	0.81
4	0.71	0.71	0.74	0.76	0.76
6	0.76	0.73	0.74	0.75	0.77
9	0.71	0.70	0.71	0.78	0.80
10	0.74	0.71	0.72	0.77	0.80
13	0.78	0.73	0.76	0.79	0.81
14	0.75	0.72	0.74	0.79	0.81
16	0.66	0.64	0.65	0.69	0.72
18	0.67	0.65	0.65	0.71	0.73
21	0.61	0.60	0.61	0.66	0.69
22	0.63	0.58	0.60	0.65	0.68
25	0.68	0.67	0.69	0.72	0.74
26	0.58	0.56	0.57	0.62	0.67

Las muestras estan numeradas de acuerdo con la tabla 3.1

CAPITULO IV

Consideraciones para la construcción de superficies plásticas reflejantes

Aun cuando no construí ninguna superficie completa, describo en este capítulo algunas consideraciones y consejos sobre la construcción de las mismas. Para ello me baso en trabajos realizados fuera de esta facultad, de experiencias de compañeros que construyeron un horno solar, de los problemas sufridos con la superficie plástica en un concentrador cilindro-parabólico construido por estudiantes de esta escuela (los cuales dieron origen a este trabajo), de conversaciones sostenidas con los fabricantes de las muestras, con los distribuidores de los diferentes plásticos y con profesores de esta escuela que tienen amplia experiencia en el campo de la energía solar.

4.1 La superficie plástica

Una vez que se determinó el área del colector debe decidirse el plástico a utilizar y su espesor, es recomendable utilizar mylar entre 0.076 - 0.254 mm de espesor, debido a las propiedades que ya he mencionado. El espesor es lo suficientemente grueso para asegurar una buena vida útil, sin tener problemas para mantener la forma de la parábola.

Si el proveedor del plástico lo vende a la medida que se le requiera, entonces es aconsejable consultar a la empresa que realizará el metalizado, para que nos indique el tamaño máximo de los pedazos de plástico, debido a que las cámaras donde se realiza este proceso no son muy grandes y además varían de una empresa a otra; y es preferible que las corte el proveedor al tamaño indicado para evitar al máximo el contacto con ellas.

Si nosotros cortamos el material sin usar guantes de tela o bien notamos que esta sucio con polvo, residuos de cinta adhesiva, huellas digitales u otra cosa, el material tiene que lavarse antes de llevarlo a metalizar.

Existen varios productos limpiadores en el mercado. El limpiador utilizado para las muestras ocupadas en este trabajo fue el QL-330 de la compañía Industrial Val. El QL-330 es un limpiador con una fuerte característica ácida que se ha desarrollado para la limpieza de manera fácil y rápida de azulejo, cerámica, aluminio, vidrio, etc. Sus características son: aspecto: líquido, color: claro, olor: característico ácido, p.h. sol. al 10 %: 1.8- 2.3, solubilidad: completa y flamabilidad: ninguna. Se diluyó en proporción de 1:20 con agua y se

sumergieron las piezas por espacio de aproximadamente 10 minutos; después se enjuagaron con abundante agua y se dejaron secar al sol.

Si las piezas solamente están ligeramente sucias pueden lavarse con agua y jabón, y enjuagarse con abundante agua. Debe evitarse al máximo frotar el plástico al secarlo, porque se raya fácilmente. Una vez limpias y secas, las piezas deben guardarse en bolsas de plástico.

4.2 Metalizado de la superficie

Este punto fué descrito ampliamente en el capítulo dos. Tan sólo haré un par de observaciones acerca de los espejos de primera y segunda superficie.

Si se decide construir un espejo de primera superficie debe considerarse que aunque se tiene mayor reflejancia cuando nuevo, al pasar el tiempo la capa protectora se deteriorará y la reflejancia disminuirá. En las muestras construidas y expuestas durante dos meses la degradación de la superficie fue muy grande excepto en una de ellas. Al parecer la resistencia de esta muestra se debe a que tiene doble capa de aluminio.

Si se opta por un espejo de segunda superficie se puede prescindir del lacado protector, pero debe tenerse mucho cuidado al manipular las superficies ya que cualquier roce desprende el aluminio.

Puede construirse un espejo de segunda superficie con lacado protector, con lo que se obtiene un reflejancia un poco menor, pero una vida más larga sin que haya desprendimiento de la capa metálica.

El ingeniero de una compañía metalizadora dice haber colaborado en proyectos de este tipo, y según su experiencia lo más recomendable es utilizar plásticos con el menor espesor posible pero que a la vez sean resistentes (0.076 o 0.125 mm) y construir espejos de segunda superficie.

4.3 Pegado de la superficie metalizada al colector

Esta parte de la construcción es de suma importancia para la durabilidad de la superficie plástica.

El primer punto es construir un sustrato cuya forma sea lo más próxima a la parábola y exenta de irregularidades, ya que la eficiencia del colector puede disminuir hasta un 10 % debido a estos errores.

Deben evitarse al máximo regiones de concentración de esfuerzos (agujeros) que son las fuentes de propagación de fracturas[11] cuando hay dilatación térmica. Cuando se utilizan plásticos muy gruesos (1 mm o más) es necesario remacharlos para forzarlos a que mantengan la forma de la parábola, es por esto que no es aconsejable utilizar plásticos con espesores mayores a 0.35 mm.

Una alternativa al utilizar materiales gruesos como el acrílico, puede ser la desarrollada en el instituto de ingeniería de la UNAM. Para evitar perforar los acrílicos, éstos se montaron a presión sobre la estructura, logrando así que el acrílico siguiera el contorno parabólico. El acrílico queda fijo en la estructura por medio de una solera de aluminio que se coloca en cada extremo desde donde se

aplica la fuerza; entre la solera y el borde del acrílico hay una tira de hule espuma que tiene como función absorber la dilatación térmica del acrílico. El problema con este método es el mantenimiento del concentrador, ya que el hule espuma se degrada rápidamente, ocasionando con ésto, el desprendimiento del acrílico. Para evitar ésto último, se puede emplear otra solera para fijar los espejos a la estructura y proteger a la vez la tira de hule espuma.

Si se utilizan películas delgadas para la construcción de los espejos, se evitan los problemas de forzar al material para que siga la forma de la parábola, y así se evitan zonas de concentración de esfuerzos que dan origen a fracturas en los plásticos y al desprendimiento de la capa metálica. Ahora bien, de alguna manera tiene que fijarse la superficie plástica a la base. Para ésto, deben utilizarse pegamentos que no sean rígidos sino que tengan la elasticidad suficiente para permitir la dilatación de la superficie reflejante.

Existen una gran cantidad de pegamentos hechos a base de elastómeros. La selección del pegamento depende de muchas cosas, principalmente del tipo de materiales que van a ser unidos, del tipo y magnitud del esfuerzo que va a soportar, de las condiciones de trabajo, etc. Considerando un sustrato de aluminio[17] o de acero, se puede usar cualquier tipo de pegamento a base de elastómeros, sin embargo, es muy importante seleccionar el pegamento adecuado para el tipo de plástico que se va a utilizar. Para el mylar se recomienda usar pegamentos a base de poli-isobutileno, goma de nitrilo o resina de silicón, también pueden utilizarse goma de neopreno y poliuretano; para el acrílico se recomienda goma de nitrilo, silicón (RTV), resina de silicón o goma de neopreno. Las principales características de los pegamentos a base de elastómeros son: buena adhesión entre 150 y 400°F, nunca se funden por completo y alta flexibilidad. Industrias Resistol produce los pegamentos 5000,

5015 y 6097 que están hechos a base de neopreno. Por su fácil adquisición se recomienda el pegamento 5000.

4.4 Costo de la superficie reflejante

Si se considera construir una superficie de mylar semejante a la del concentrador cilindro-parabólico que se encuentra en la escuela, el costo sería:

Costo de 3.27 m ² de mylar de 0.125 mm	\$ 49
Costo del proceso de metalizado	\$ 350

Costo total	\$399

Estos precios fueron conseguidos en julio de 1996.

**ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA**

Conclusiones

En la construcción de superficies reflejantes para concentradores solares de canal parabólica no es recomendable utilizar plásticos cuyo espesor sea mayor a 0.35 mm. Esto debido a los problemas que se presentan para mantener fija la superficie reflejante a la base del colector.

El plástico con mejores propiedades ópticas y de durabilidad es el acrílico, pero debido a que no se comercializa en espesores menores de 1.5 mm, no debe utilizarse en la construcción de colectores concentradores.

La mejor opción para sustituir al acrílico es el mylar. En las pruebas realizadas con este material, se encontró que la reflejancia disminuye sólo entre 1.4 y 3.8 % en comparación con el acrílico. Además se puede utilizar en espesores que van de 0.025 a 0.254 mm, espesores que no presentan ningún esfuerzo significativo al flexionarlos, con lo que se reducen los problemas para sujetar los espejos a la base del colector.

Los problemas con el mylar es que se raya más fácilmente y que su degradación debido a los rayos UV es mayor que la del acrílico, desgraciadamente no sabemos qué tanto mayor es ésta, ni qué tanto depende del espesor utilizado. En lo personal considero que sería interesante hacer estudios más profundos sobre este punto.

En lo referente a construir espejos de primera o segunda superficie, definitivamente se obtiene mayor reflejancia con espejos de primera superficie, pero éstos llevan una capa protectora, y es en lo referente a la durabilidad de ésta donde hay que investigar más, ya que en su exposición a la intemperie durante

dos meses, unas muestras se destruyeron casi por completo y otras quedaron casi intactas. En lo que se refiere a las muestras de segunda superficie construidas con pvc, su reflectividad disminuyó notablemente, mientras que en las de mylar disminuyó en promedio 3.4 %, pero después de ser limpiadas con un protector abrillantador este valor se redujo a 1.9 %. El uso periódico de este protector posiblemente ayude a la duración de las superficies ya que asegura proteger a los plásticos contra la acción del ozono, oxígeno y rayos UV.

Bibliografía

- [1] Engineering materials: properties and selection; Kenneth G. Budinski; Prentice Hall.
- [2] Tecnología de plásticos para ingenieros; C. M. von Meysengurg; Urmo S. A.
- [3] Engineerig materials technology; James A. Jacobs, Thomas F. Kilduff; Prentice Hall.
- [4] Plastic parts technology; Edward A. Muccio;
- [5] Handbook of plastic materials and technology; Rubin;
- [6] Encyclopedia of chemical technology; Kirk-Othmer; John Wiley and Sons.
- [7] Ullman's encyclopedia of industrial chemistry; Gerhartz, Wolfgang/ Ed.; Weinheim Federal Republic of Germany: VCH.
- [8] Tratamiento de las superficies de plástico; Klaus Stoeckhert; Gustavo Gili.
- [9] Metalizado de los materiales plásticos; Juan Balaña; Ediciones Cedel.
- [10] Tesis: Metalizado de superficies plásticas; Agustín de la Maza Ambell; F.Q., UNAM.
- [11] Tesis: Concentradores solares canal parabólica; José Valdés Palacios; F.I., UNAM.
- [12] Enciclopedia de tecnología química, vol. 12; Raymond E. Kirk, Donald F. Othmer; Unión tipográfica editorial hispano-americana.
- [13] Metal handbook : properties and selection of metals, vol. 1: ASM.
- [14] The nature and properties of engineering materials; Zbigniew D. Jastrzebski; John Wiley and Sons.
- [15] Optica básica; Daniel Malacara; S.E.P. Fondo de Cultura Económica.
- [16] Optics system manual; PASCO scientific.
- [17] Handbook of plastics, elastomers and composites; Charles A. Harper; McGraw-Hill.

Anexo A

Lista de proveedores de las muestras aluminizadas:

Fabricante # 1

Acabados metálicos.

Plásticos # 17.

Tel. 576-7244

Fabricante # 2

Metalizadora al alto vacío.

Poniente 150 # 683

Tel. 587-1057

Fabricante # 3

Metalizados económicos S.A.

Lago Amatitlán # 119

Tel. 527-8003

Distribuidores de mylar:

Artes gráficas internacionales, S.A de C.V.

Poniente 122 # 500

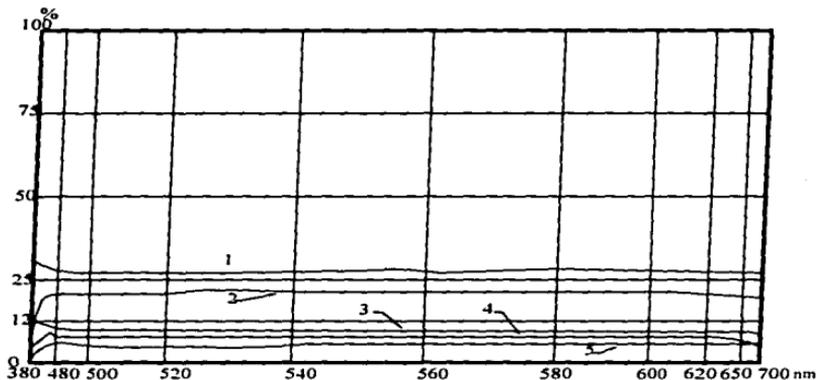
Tel. 368-6834

Artículos y productos S.A.

Pisco # 620

Tel. 586- 1701

**REFLEXIÓN DE ALGUNOS MATERIALES
PLÁSTICOS
(Incidencia normal)**



- 1 PE espuma
- 2 PVC armado 0.15 mm
- 3 PE 0.10 mm
- 4 PVC 0.10 mm
- 5 Poliéster 0.10 mm

Aplicación de los plásticos en la agricultura
Felix Robledo de Pedro, Luis Martin Vicente
Ediciones Mundi-Prensa