

3 Análisis de las tecnologías de procesamiento de polímeros que se pueden utilizar para la fabricación de elementos ópticos.

3.1 Introducción

Algunos polímeros son transparentes y sirven para la fabricación de elementos ópticos. Muchos de esos materiales exhiben ciertas deficiencias físicas comparadas con el vidrio. Por otro lado, los procesos de fabricación de elementos de plástico son más sencillos que de los vidrios y pueden ser la mejor opción en algunas aplicaciones.

Algunos de los polímeros poseen un comportamiento ópticamente útil, a pesar de que muchos de estos materiales originalmente fueron desarrollados para otros usos. Posiblemente las únicas excepciones son los materiales usados para los anteojos (Polydiallylglycol), y materiales para el almacenamiento de información óptica (policarbonato). Mencionar las propiedades ópticas de cualquier material polimérico debe ser hecho con cierta precaución y reserva, ya que a diferentes grados de fluidez pueden mostrar ligeramente diferentes propiedades e índices de refracción. Los aditivos para regular la lubricidad, el color, etc. pueden producir alteraciones en las propiedades de la transmisión espectral.

Las razones de la importancia comercial y tecnológica de los polímeros son las siguientes:

- Los plásticos se pueden moldear para conformar partes de intrincada geometría, sin necesidad de procesamientos posteriores;
- Los plásticos poseen diferentes propiedades para muchas aplicaciones de ingeniería donde la resistencia no es un factor determinante como: Baja densidad con respecto a los metales y a los cerámicos, buena relación de resistencia al peso

para ciertos polímeros, alta resistencia a la corrosión y baja conductividad eléctrica y térmica;

- Son competitivos en costo con los metales;
- Los polímeros generalmente requieren menos energía que los metales para su producción;
- Ciertos plásticos son traslucidos y transparentes lo cual los hace competitivos con el vidrio en algunas aplicaciones.

Por otra parte, los polímeros tienen generalmente las siguientes limitaciones:

- Baja resistencia con respecto a los metales y los cerámicos;
- Las temperaturas de servicio se limitan a sólo algunos cientos de grados debido al ablandamiento de los termoplásticos, o la degradación de los termofijos;
- Algunos polímeros se degradan cuando se sujetan a la luz del sol y otras formas de radiación;
- Los plásticos exhiben propiedades viscoelásticas, lo cual puede ser una limitación distintiva en aplicaciones que implican carga.

3.2 Aplicación de los polímeros en la óptica

3.2.1 Lentes

Además de los vidrios inorgánicos, existen ciertos plásticos que son utilizados en la industria de anteojos. Por ejemplo las resinas termoestables basadas en diglicol carbonato, derivados de polimetilmetacrilato y policarbonatos han sido usados para producir lentes plásticas no fotocromáticas y fotocromáticas⁵.

El desempeño de las lentes de plástico fotocromático es dependiente de la temperatura. Además de variar la atenuación de la luz, las lentes fotocromáticas ofrecen protección contra los rayos UV. Un recubrimiento de plástico fotocromático en los lentes de cristal clásicos ofrece una resistencia contra ralladuras y antireflectividad [13].

3.2.2 Aplicaciones en telecomunicaciones

Con la llegada de la fibra óptica en las telecomunicaciones en los años de 1970, las aplicaciones prácticas para dispositivos ópticos que operan sobre la base de efectos electro-ópticos se convirtieron en un objetivo muy serio. Además de materiales inorgánicos muchos materiales poliméricos han encontrado un uso en una variedad de configuraciones de los dispositivos.

Pueden funcionar como filtros de longitud de onda de Bragg sintonizables, moduladores de amplio ancho de banda para telecomunicaciones, moduladores para sensado en 3D, transductores de señales electro-ópticas, conmutadores en redes ópticas y controladores de fase para radiofrecuencia, señales ópticas, etc. [14].

⁵ Propiedad de los materiales transparentes de oscurecerse con la presencia del sol

3.2.3 Fibra óptica plástica

Las fibras ópticas plásticas han sido formadas de varios polímeros amorfos como policarbonato, polimetilmetacrilato, poliestireno y diglicol dialicarbonato [16]. Recientemente la fibra óptica plástica ha llegado a ser atractiva y parece ser de gran demanda para transmisiones y procesamiento en las comunicaciones ópticas que transmiten una gran cantidad de datos como Internet [15-17]. En comparación con las fibras de sílice, las fibras de plástico tienen un mayor calibre, son más baratas en su elaboración y es más sencillo este proceso. Sin embargo, debido a la gran atenuación de la luz y su estrecho ancho de banda de transmisión, las fibras de plástico sólo pueden ser empleadas en redes de información sobre distancias de varios cientos de metros. La Tabla 3.1 muestra una comparación breve entre las fibras ópticas de sílice y las fibras ópticas de plástico.

Tabla 3.1 Propiedades típicas de las fibras ópticas de plástico y sílice [16]

Propiedad	Polimetilmetacrilato	Policarbonato	Si
Coefficiente de atenuación α (dB/km)	125 a $\lambda=650$ nm.	1000 a $\lambda=650$ nm.	0.2 a $\lambda=1300$ nm.
Capacidad de transmisión (MHz km)	<10	<10	10^2 a 10^3
Apertura numérica	0.3 a 0.5	0.4 a 0.6	0.1 a 0.25
Diámetro de la fibra (mm)	0.25 a 10	0.25 a 10	9×10^{-3} a 1.25×10^{-1}
Máxima temperatura de operación ($^{\circ}$ C)	85	85	150

Como se puede observar las fibras de sílice son más eficientes si hablamos de atenuación y ancho de banda, pero su diámetro es pequeño y es poco flexible, consecuentemente, se debe de contar con cierta habilidad y herramientas de precisión para conectar dos fibras ópticas de sílice además que es un proceso que consume tiempo. La fibra de plástico tiene más modos electromagnéticos que la fibra de sílice, debido a que, su diámetro es más ancho además de contar con una mayor flexibilidad que las fibras ópticas de sílice. Debido a que la NA y el cono de aceptación de las fibras ópticas de plástico son mayores que las fibras ópticas de sílice, la captación de luz de las fibras

ópticas plásticas es mayor. Asimismo la instalación de fibras ópticas plásticas es más sencilla y su costo es mucho menor.

3.3 Polímeros y polimerización

Un polímero es un compuesto que consiste en moléculas de cadena larga, cada molécula esta hecha de unidades repetitivas que se conectan entre si. Puede haber miles o millones de unidades en una sola molécula de polímero. El término se deriva de las palabras griegas *Poly*, que significa muchos, y *meros* que significa parte. La mayoría de los polímeros se basan en el carbono, por consiguiente, son considerados sustancias químicamente orgánicas. Sin embargo incluye un número de polímeros inorgánicos.

Los polímeros se sintetizan mediante la unión de muchas moléculas pequeñas para formar moléculas muy grandes, llamadas macromoléculas, las cuales poseen una estructura en forma de cadenas. Las pequeñas unidades, llamadas monómeros, son generalmente moléculas orgánicas insaturadas simples, esto es, que contienen al menos un doble enlace carbono-carbono. Los átomos se mantienen unidos en esta molécula por medio de enlaces covalentes, y cuando se unen para formar el polímero, esos mismos enlaces mantienen unidos a los eslabones de la cadena, por lo tanto, cada molécula grande se caracteriza por sus fuertes enlaces primarios.

La síntesis del polímero es el proceso de combinar muchas moléculas pequeñas (monómeros) en una cadena covalente consolidada. Durante el proceso de la polimerización, algunos grupos químicos pueden ser perdidos de cada monómero. El pedazo distinto de cada monómero que se incorpore en el polímero se conoce como residuo de la unidad. Los procesos de manufactura más ampliamente utilizados son los siguientes.

Monómero es una substancia de moléculas pequeñas que finalmente forman el polímero al unirse en largas cadenas moleculares. Las características que comparten todas las moléculas pequeñas capaces de formar polímeros por adición es que son químicamente insaturadas. A pesar de que esta descripción podría sugerir que dos átomos

de carbono unidos por un doble enlace forman un enlace mas fuerte que un par unido por un enlace simple, en realidad no es así. La configuración electrónica en un doble enlace es más favorable porque se halla en un nivel de energía más bajo que uno simple.

3.3.1 Polimerización por adición

En el método de adición para elaborar polímeros se utiliza el monómero como materia prima. El procedimiento se inicia con el uso de un catalizador químico (iniciador) que abre los enlaces dobles de carbono en algunos de los monómeros. Estos monómeros se vuelven altamente reactivos debido a sus electrones libres y capturan otros monómeros para empezar a formar cadenas reactivas. Las cadenas se propagan, capturando además otros monómero, uno a la vez, hasta que se producen grandes moléculas y la reacción termina. El proceso funciona como se indica en la Figura 3.1.

Algunos ejemplos de polímeros formados por este método son: polipropileno, cloruro de polivinilo, polimetilmetacrilato, poliestireno, politetrafluoroetileno, polisopreno entre otros.

3.3.2 Polimerización por condensación

Este método de obtención de polímeros incluye reacciones químicas comunes. La polimerización por condensación ocurre entre las moléculas de monómeros por eliminación de una molécula pequeña, generalmente agua. Debido a que la reacción se lleva a cabo por etapas, este método de obtención de polímeros se llama polimerización de crecimiento gradual. Su nombre anterior era polimerización por condensación, porque las reacciones químicas de la esterificación⁶ se denominan reacciones de condensación y se distinguen por la eliminación de una molécula pequeña (agua o alcohol). Entre los polímeros que se producen por este método se encuentra el polietilentereftalato, el policarbonato (bisfenol) y las poliamidas como el nylon.

⁶ Proceso en el cual se sintetiza un ester

Los polímeros se dividen en plásticos y hules, los plásticos se pueden dividir en las siguientes categorías.

1. Polímeros termoplásticos (TP).- El polietileno (PE), el polipropileno (PP), el poliestireno (PS), el polimetilmetacrilato (PMMA), el policloruro de vinilo (PVC), el politereftalato de etileno (PET), el teflón (o politetrafluoretileno, PTFE) y el nylon (un tipo de poliamida) ;
2. Polímeros termofijos (TS).- Poliuretanos Urea, resinas, melamina Resinas fenólicas, Copolímeros y estireno-butadieno;
3. Elastómeros (E).- Caucho natural (NR), Poliisopreno (IR, forma artificial del caucho natural), Polibutadieno, Caucho estireno-butadieno (SBR), Caucho butilo (IIR), Caucho nitrilo (NBR) y Neopreno (CR).

Por otro lado los hules es un polímero natural o sintético, en el primer caso hecho de la savia de plantas específicas, como por ejemplo la Castilla elástica, y para el segundo compuesto por otros polímeros.

Los polímeros usados en la óptica se encuentran básicamente dentro de dos categorías, los termofijos y los termoplásticos. El grupo de polímeros termofijos son aquellos donde la reacción de polimerización toma lugar durante la creación de la pieza, la cual puede ser producida por moldeo. La pieza que ha sido creada al final de la reacción puede ser posprocesada. En general las resinas termofijas no pueden ser fundidas o reformadas.

3.3.3 Polímeros termoplásticos

Una característica que define a los polímeros termoplásticos es que pueden calentarse desde el estado sólido hasta el estado líquido viscoso, y al enfriarse vuelven a adoptar el estado sólido; además, este ciclo de enfriamiento puede aplicarse muchas veces sin degradar al polímero. La razón de dicho comportamiento es que los polímeros termoplásticos consisten en macromoléculas lineales (ramificadas) que no se encadenan

transversalmente cuando se les calienta. Por el contrario, los termofijos y los elastómeros sufren un cambio químico cuando se les calienta, lo cual hace que sus moléculas se unan transversalmente y fragüen permanentemente.

Muchos de los polímeros que se utilizan en la óptica se encuentran dentro del grupo de los materiales termoplásticos que se suministran en forma polimerizada. Estos materiales son normalmente adquiridos como pequeños pellets. Estos pellets son calentados a una temperatura mas allá del punto de reblandecimiento, por lo tanto llega a formarse una masa viscosa. Esta masa es depositada en un molde para así tomar su forma y así formar la pieza deseada.

Las piezas pueden ser creadas por el proceso de modelado por inyección. La capacidad de la tecnología de moldeo moderna para producir piezas ópticas con una superficie de buena calidad ha hecho posible la creación de componentes ópticos para una amplia variedad de aplicaciones. Dentro de estas aplicaciones se encuentran lentes intraoculares, aplicaciones militares, una serie de productos de consumo y un número de artículos como carcasas para teléfonos móviles, figuras de juguete, ruedas dentadas para mecanismos de regulación en los cuales se encuentran combinadas funciones ópticas, mecánicas y eléctricas en una sola pieza.

Los termoplásticos típicos a temperatura ambiente poseen las siguientes características:

1. Menor rigidez, el módulo de elasticidad es dos veces (en algunos casos tres) más bajo que los metales y los cerámicos;
2. La resistencia a la tensión es más baja, cerca del 10% con respecto a la de los metales;
3. Dureza muy baja;
4. Ductilidad⁷ más alta en promedio, con un tremendo rango de valores.

⁷ Propiedad de algunos materiales para deformarse sin romperse

Los acrílicos son polímeros derivados del ácido acrílico ($C_3H_4O_2$) y de sus compuestos. El termoplástico más importante en el grupo acrílico es el polimetilmetacrilato (PMMA); un nombre más familiar para éste producto es plexíglass (marca registrada de Rohm and Haas para el PMMA). Es un polímero lineal que es más sindiotáctico y, por tanto, amorfo. Su propiedad principal es que posee una excelente transparencia que lo hace competitivo con el vidrio en aplicaciones ópticas. Algunos ejemplos incluyen micas para luces traseras de automóviles, instrumentos ópticos y ventanas de avión. Su limitación con respecto al vidrio es una resistencia al rayado extremadamente más baja. Otros usos del PMMA incluyen ceras para piso y pinturas. Los acrílicos encuentran otros usos importantes en fibras textiles; el poliacrilonitrilo (PAN) es un ejemplo mejor conocido bajo los nombres familiares de Orlón (DuPont) y Acrilán (Monsanto).

3.3.4 Polímeros termofijos

Debido a las diferencias en la composición química y estructura molecular, las propiedades de los plásticos termofijos son diferentes de los termoplásticos. En general, los termofijos son:

- Más rígidos, con módulos de elasticidad dos o tres veces más grandes;
- Frágiles, prácticamente no poseen ductilidad;
- Menos solubles en los solventes comunes;
- Capaces de funcionar a temperaturas más altas;
- No pueden ser refundidos, en lugar de esto se degradan o se queman.

Las resinas epóxicas se basan en un grupo químico llamado epóxicos. La formulación más simple de los epóxicos es el óxido de etileno (C_2H_3O), la epiclorhidrina (C_3H_5OCl) es un epóxico mucho más utilizado para producir resinas epóxicas. Los epóxicos no curados tienen un bajo grado de polimerización. Se necesita usar un agente de curado para incrementar el peso molecular y encadenar transversalmente al epóxico. Los posibles agentes de curado incluyen a las poliamidas y a los anhídridos ácidos. Los epóxicos curados son notables por su resistencia, adhesión, resistencia al calor y a los

agentes químicos. Sus aplicaciones incluyen recubrimientos superficiales, pisos industriales, compuestos reforzados con fibra de vidrio y adhesivos. Las propiedades aislantes de los epóxicos termofijos los hacen útiles en varias aplicaciones electrónicas como el encapsulado de transistores y en la laminación de tarjetas para circuitos impresos.

Las resinas termofijas mas comúnmente encontradas son aquellas que se usan para la producción de lentes oftálmicos. El monómero, que es almacenado en forma de liquido a temperatura baja, es introducido en un molde donde la polimerización toma lugar, formando una pieza que toma la forma de la cavidad que la contiene. Alternativamente, los elastómeros como la epoxi han sido usados con cierto éxito para formar superficies reflectivas, y para producir figuras esféricas.

3.4 Factores de Selección de los polímeros útiles en la óptica

Prácticamente todos los polímeros con propiedades ópticas útiles son mucho menos densos que cualquier vidrio óptico, haciendo a los polímeros dignos de considerarse en aplicaciones donde el peso es un parámetro importante. Muchos de ellos muestran propiedades de resistencia a los impactos que exceden a algunos vidrios de sílice, haciéndolas útiles para productos dirigidos a los consumidores donde la seguridad es importante.

La ventaja más importante de la óptica polimérica es la considerable creatividad que es posible lograr en los diseños tanto óptica como mecánicamente. Si bien las limitaciones de diseño en la fabricación y el diseño de la óptica de vidrio están bien definidos, la réplica de varios procesos utilizados en la fabricación de vidrios pueden ser usados en la fabricaron de la óptica de polímero abriendo áreas de oportunidad única para la creación de nuevos sistemas ópticos y otros componentes que serían impensables o poco viables en vidrio.

3.5 Propiedades físicas

3.5.1 Densidad

La densidad de los cristales varía de 3.3 g/cm^3 a cerca de 6.3 g/cm^3 . El polímero más pesado posee una densidad de sólo 1.4 g/cm^3 , mientras que el más ligero tiene una densidad de 0.83 g/cm^3 [19]

3.5.2 Dureza

Las superficies ópticas se esperan que sean libres de imperfecciones, esto es, que no estén rayadas, no tengan hoyos o algún defecto de fabricación. Aunque los defectos superficiales raramente afectan la calidad de la imagen. Ya sea por el uso ordinario, por el procedimiento de limpiado, resultan en algunas ralladuras con el paso del tiempo. Los cristales más comunes poseen una dureza suficiente que son relativamente inmunes a este tipo de daños, si se usan con cuidado.

Por otro lado los polímeros son tan blandos que algo muy pequeño los marcaría permanentemente. La dureza de los polímeros es difícil de cuantificar (en comparación con la de los cristales), ya que este parámetro no es dependiente sólo del material, si no que es también dependiente del proceso por el cual se fabricó. Cabe mencionar que algunos procedimientos que pueden resultar en pequeños daños a los elementos de cristal pueden producir evidencias considerables de abrasión en la superficie de algunos elementos hechos de polímeros, particularmente en los termoplásticos.

3.5.3 Temperatura

Mientras que los cristales tienen una resistencia a altas temperaturas entre los 400 y los $700 \text{ }^\circ\text{C}$, muchos de los cristales con propiedades ópticas que son de interés son muy frágiles, y son propensas a fallar si se enfrían muy rápidamente. Estas fallas son comúnmente atribuidas a la contracción por enfriamiento inducido.

Los polímeros por otro lado tienen un rango de temperatura de operación menor, en algunos casos no es mayor que los 60 °C. Este límite es aproximadamente de 250°C en algunos de los fluoro polímeros. La conductividad térmica de muchos de estos polímeros puede ser tanto como un orden de magnitud inferior a la de los cristales y el coeficiente de expansión térmica que caracteriza a los polímeros es comúnmente un orden de magnitud mayor que el asociado a los cristales. Algunas de las propiedades físicas más relevantes de los polímeros más comúnmente usados en dispositivos ópticos son mostradas en la Tabla 3.2

Tabla 3.2 Propiedades físicas

Material	Densidad (ρ)	Coefficiente de expansión térmica (α)	Temperatura máxima (T_s)	Conductividad térmica (K)	Absorción del agua (A_{H_2O})
Polimetilmetacrilato	1.18	6	85	4-6	0.3
Poliestireno	1.05	6.4-6.7	80	2.4-3.3	0.03
SAN (Estireno acrilonitrilo)	1.07	6.4	75	2.8	0.28
Policarbonato	1.25	6.7	120	4.7	0.2-0.3
Poli metil pentano	0.835	11.7	115	4	0.01
Nylon	1.185	8.2	80	5.1-5.8	1.5-3
Poliarilato	1.21	3.3	-	7.1	0.26
Polisulfona	1.21	2.5	150	2.8	0.1-0.6

3.5.4 Conductividad térmica y eléctrica

Muchos materiales que muestran poca conductividad térmica comúnmente tienen una baja conductividad eléctrica. Varios polímeros son muy eficientes como aislantes eléctricos, sin embargo estos adquieren una carga estática en su superficie fácilmente y se disipa muy lentamente. No es de extrañar que dichas superficies cargadas rápidamente atraigan contaminantes cargados con carga opuesta a ellas, muchos de estos contaminantes son más duros que los plásticos. Por lo tanto en un intento de limpiar dichas partículas acumuladas en la superficie se causan ciertos daños en esta. Aplicando

un recubrimiento de un material inorgánico se proporciona una mayor conductividad a la superficie, de esta forma se atraen menos contaminantes y así se mejora la resistencia a la abrasión.

3.5.5 Absorción de agua

Muchos polímeros, particularmente los termoplásticos, son higroscópicos, esto es, que tienen la capacidad de absorber o ceder agua al medio ambiente. Tras su transformación, el agua puede ser reabsorbida si las superficies de los plásticos no fueron tratadas para inhibir la absorción. Mientras que solo una pequeña cantidad de agua se adhiere a las superficies de los elementos hechos de cristal. Los polímeros pueden absorber agua cerca de entre el 0.003 a 2 por ciento de su peso. El agua acumulada puede producir cambios dimensionales, así como algunas modificaciones de menor importancia en la transmisión espectral.

3.5.6 Resistencia a la radiación

Muchos de los polímeros utilizados en la óptica exhiben cierta fluorescencia si son irradiados por radiación de alta energía. La radiación de alta energía ultravioleta, además produce cantidades variables de reticulación en las cadenas de los polímeros. Esto típicamente da como resultado en la decoloración del material, y una absorción no uniforme de energía en el material.

3.6 Propiedades ópticas

3.6.1 Transmisión espectral

En general, los polímeros basados en carbón utilizados en aplicaciones ópticas son materiales que trabajan en longitudes de onda de la luz visible, ya que la absorción es bastante fuerte en el ultravioleta y en el infrarrojo [20, 21].

Algunas variantes del polimetilmetacrilato tienen transmisiones útiles debajo de los 300 nm [22]. Muchos polímeros, sin embargo, empiezan a absorber en una porción del azul del espectro visible, y tiene regiones adicionales de absorción cerca de los 900 nm, 1150 nm, 1350 nm, y finalmente llegan a ser totalmente opacas cerca de los 2100 nm. La estructura química que resulta en estas regiones de absorción es común para casi todos los polímeros basados en carbón, por lo tanto las características de transmisión interna de estos materiales es similar, con la posible excepción de las regiones del azul y del ultravioleta cercano.

3.6.2 Índice de refracción

La química de los polímeros basados es considerablemente diferente de los vidrios de sílice en el uso común como materiales ópticos. Consecuentemente, las propiedades refractivas difieren significativamente. En general los índices de refracción son inferiores, se extiende a cerca de 1.73 en el extremo superior, y hasta un límite inferior de alrededor de 1.3. Una característica muy particular es que el número de Abbe⁸ varía mucho en estos materiales. Los datos sobre el índice de refracción de algunos de estos polímeros se muestran en la Tabla 3.2

Tabla 3.2 Índice de refracción de algunos polímeros a diferentes longitudes de onda

Longitud de onda nm	PMMA	P-estireno	P-carbonato	SAN
1014	1.483	1.5726	1.5672	1.551
852	1.485	1.5762	1.571	1.555
706.5	1.487	1.582	1.5768	1.560
656.3	1.489	1.5849	1.5799	1.562
643.9	1.4896	1.5858	1.580	1.563
589.3	1.4917	1.5903	1.585	1.5673
587.6	1.4918	1.5905	1.5855	1.5674
546.1	1.4938	1.595	1.590	1.571
486.1	1.4978	1.604	1.599	1.579
480	1.4983	1.605	1.600	1.580

⁸ El número de Abbe de un material transparente es una cantidad adimensional que surge al comparar el índice de refracción del material a distintas longitudes de onda.

435.8	1.502	1.615	1.611	1.588
404.7	1.506	1.625	1.622	1.597
465	1.5136	1.643	1.643	1.612

3.6.3 Homogeneidad

Debe considerarse que los polímeros son modelados y no formados mecánicamente. Por lo tanto las propiedades ópticas de una pieza, no pueden ser cuantificadas antes de la manufactura del elemento. De hecho, las propiedades ópticas precisas de un material en un elemento óptico son virtualmente precisadas en función del material y por medio de que proceso fue fabricada la parte. Algunos materiales, como los estírenos y las resinas son cristalinos en cierto grado, por lo tanto inherentemente son birrefringentes. La birrefringencia puede ser desarrollada en materiales amorfos.

3.7 Diseño óptico

Prácticamente todas las técnicas de diseño óptico que se han desarrollado para su uso con materiales de vidrio funcionan bien con la óptica de polímero. El trazado de rayos, los métodos de optimización, y los fundamentos de la construcción óptica son igualmente adecuados para vidrio o plástico. El enfoque generalizado para el diseño óptico con materiales poliméricos debe estar fuertemente orientado a medio, es decir, se debe hacer para sacar provecho de la flexibilidad de diseño de los materiales y procesos de fabricación. Se busca una integración de forma y función, debido a las características mecánicas de los polímeros las piezas se pueden moldear integralmente con la óptica para reducir el número de pieza de metal y el contenido de mano de obra de montaje en muchos sistemas.

3.7.1 Selección del material

Para escoger el mejor material, se debe de tener las menores aberraciones cromáticas, además de que el número de Abee debe permanecer en un valor no muy

alejado al central, eso es, que el índice de refracción de material no varíe demasiado con la longitud de onda.

La mayoría de los diseñadores de lentes prefieren utilizar materiales con alto índice de refracción exclusivamente en su trabajo. La potencia óptica debe ser generada con el fin de formar imágenes, dicha potencia se debe a la combinación de la curvatura de la superficie óptica y el índice de refracción, estas dos variables se pueden negociar en el proceso de diseño de la lente. Como es bien sabido la curvatura genera una aberración más fácilmente que una discontinuidad de índice de refracción. Generalmente se prefiere para alcanzar una determinada cantidad de potencia de refracción a través del uso de una curvatura baja y un índice de refracción alto. Desde esta perspectiva, los polímeros están en clara desventaja, la mayoría de los cuales son materiales de bajo índice.

3.7.2 Superficies esféricas

Se conocen como superficies esféricas aquellas que no son esféricas ni planas. Estas superficies son importantes en sistemas ópticos. La importancia de este tipo de superficies es debido a que mediante su uso es posible evitar los defectos presentes en las imágenes tales como: astigmatismo y distorsión tipo barril, que son consecuencia de las superficies esféricas. Además son utilizadas para reducir las pérdidas de acoplamiento de láseres semiconductores a fibras ópticas.

Una consideración en la utilización de los polímeros en la óptica es la libertad de emplear superficies no esféricas. Si bien estos pueden ser difíciles (y muy caros) para producir en vidrio, los procesos que crean las piezas ópticas de plástico no hacen diferencia entre las superficies esféricas y no esféricas.

Un diseñador de lentes, puede asegurar que la flexibilidad que las superficies esféricas ponen a disposición es muy notable. La fabricación de las superficies esféricas, son por medio de esmerilado y pulido, estos procesos pueden generar grandes cantidades de aberraciones de alto orden si se utiliza en cualquier geometría óptica que se aparta

significativamente de las condiciones aplanéticas, es decir, suprimir la aberración por una superficie esférica.

Por otra parte, la capacidad de utilizar formas de superficie que son más complejas que las esferas, permite a los componentes de alta aberración ser moderados, reduciendo la cantidad de "aberración transferida". En un sistema óptico de varios elementos, especialmente una cascada que emplean superficies asféricas, el rendimiento de las imágenes necesarias se puede lograr utilizando una menor cantidad de elementos. Y debido al hecho de que la aberración se ve disminuida, la sensibilidad a los errores de posicionamiento también puede ser reducida, con el resultado de que un sistema óptico asférico en realidad puede ser más tolerante a la fabricación de su homólogo esférico.

En la práctica, el uso de superficies asféricas en los elementos plásticos va más allá de compensar por los obstáculos impuestos por los bajos valores de índice de refracción. Con el uso de superficies asféricas, es posible forzar, si no es que rompen, muchas de las normas que limitan el diseño con superficies esféricas. Las superficies asférica adicionalmente hacen frente a las aberraciones monocromáticas.

3.7.3 Consideración de procesamiento

De la misma manera que el diseño óptico con polímeros es diferente del diseño óptico con el vidrio, la fabricación y el montaje son también cuestiones muy diferentes. Las principales cuestiones que requieren ser examinadas son los relacionados con los propios materiales. Si bien es posible caracterizar el vidrio de un sistema óptico con absoluta seguridad antes de realizar cualquier operación de fabricación, con polímeros, el conocimiento de los materiales de partida es sólo una indicación aproximada de las propiedades ópticas de las piezas acabadas.

Cuando se cuentan con los datos de las propiedades ópticas ofrecidos por el proveedor de polímero, se debe tener en cuenta que estos números sólo se aplican a las muestras de medición que han sido predefinidas a ciertas condiciones, han experimentado

un tiempo de residencia especificado en el barril de extrusión en condiciones específicas de temperatura, han sido inyectadas en el cavidad del molde en las tasas específicas y presiones, y así sucesivamente. En consecuencia, es poco probable que las propiedades de refracción de un elemento de polímero se ajusten estrictamente a los valores de catálogo (si estos valores son efectivamente suministrados). Asimismo la homogeneidad, el contenido de burbujas, las propiedades de dispersión, y así sucesivamente, son todos los procesos dependientes. Por otra parte, mientras que las hojas de propiedades ópticas de los materiales de vidrio son más precisas.

3.8 Proceso de conformación de los plásticos

La importancia tecnológica y comercial de estos procesos de conformado deriva del creciente valor de los materiales que se procesa y de que las aplicaciones de los plásticos se han incrementado mucho más que para los metales o los cerámicos, así, lo mismo sucede con el vidrio. Se pueden identificar varias razones por las cuales los procesos de conformado de plástico son importantes:

- La variedad de procesos de conformado y la facilidad con que se procesan los polímeros permiten una variedad casi ilimitada de formas para las piezas;
- Muchas partes de plástico se forman por moldeo, el cual es un proceso de forma neta, esto es, no se requieren formados posteriores;
- No se requiere acabado con pintura para los plásticos.

De acuerdo con la forma del producto resultante, los procesos de conformación de plásticos se puede clasificar en:

- Productos extruidos continuos con secciones transversales constante;
- Hojas o láminas continuas y películas;
- Filamentos continuos (fibras);
- Partes moldeadas, sólidas en su mayoría;
- Partes moldeadas huecas con paredes delgadas;

- Fundiciones.

3.8.1 Moldeo por compresión

Es un proceso antiguo y muy utilizado para plásticos termofijos. El proceso es ilustrado en la Figura 3.2 para un plástico termofijo.

1. Se coloca en el fondo un molde caliente, una cantidad fija de compuesto de moldeo llamado carga;
2. Se unen las mitades del molde para comprimir la carga y forzarla a tomar la forma de la cavidad;
3. Se calienta la carga a través del molde para que polimerice y cure el material, transformándose en una pieza sólida;
4. Se abre el molde y se retira la parte de la cavidad.

La carga inicial del compuesto de moldeo puede estar en forma de polvos, pellets, líquido o partes preformadas. La cantidad de polímero debe controlarse con toda precisión para obtener una consistencia uniforme en el producto moldeado.

3.8.2 Moldeo por inyección

El fundamento del moldeo por inyección es inyectar un polímero fundido en un molde cerrado y frío, donde solidifica para dar el producto, ilustrado en la Figura 3.3. Es un proceso en el que un polímero se calienta hasta un estado altamente plástico y se hace fluir bajo alta presión dentro de una cavidad de un molde donde solidifica. La parte moldeada, llamada moldeo, se remueve entonces de la cavidad. El proceso produce componentes separados que son casi siempre formas netas. La duración del ciclo típico de producción es de 10 a 30 segundos dependiendo del molde puede llegar a tardar ciclos de minutos. El molde puede tener más de una cavidad, de manera que se pueden producir múltiples piezas moldeadas en cada ciclo.

La limitante es la capacidad de fabricar un molde cuya cavidad tenga la misma forma que la pieza, además, el molde debe propiciar la remoción de la pieza.

3.8.3 Extrusión

Es la acción de forzar, por medio de presión, a pasar a través de un “dado” o “boquilla” un plástico fundido, el procedimiento se ha utilizado para metales, como el aluminio y cerámicos. La extrusión es un proceso de compresión en el cual se fuerza al material a fluir a través del orificio de un dado para generar un producto largo y continuo, cuya forma de la sección transversal queda determinada por la forma del orificio, ilustrado en la Figura 3.4.

Es un proceso de conformación de polímeros que se usa ampliamente con termoplásticos y elastómeros para producir masivamente artículos como tubos, ductos, mangueras, láminas y películas, filamentos continuos, recubrimiento de alambres, etc.

En la extrusión de polímeros el material se alimenta en forma de pellets a un cilindro de extrusión, donde se calienta y se le hace fluir a través del orificio de un dado por medio de un tornillo giratorio. Los dos componentes principales del extrusor son el cilindro y el tornillo. El tornillo de un extrusor tiene uno o dos “hilos” en espiral a lo largo de su eje, el dado no es un componente del extrusor, sino una herramienta especial que debe fabricarse con el perfil particular a producir. El diámetro interno del cilindro extrusor fluctúa típicamente entre 25 a 150 mm, la tolva que contiene el material de alimentación se localiza en un extremo del cilindro. Los pellets se alimentan por gravedad sobre el tornillo giratorio, que mueve el material a lo largo del cilindro. Se utilizan calentadores eléctricos para fundir inicialmente los pellets sólidos: el mezclado y el trabajo mecánico subsiguiente del material genera el calor adicional que mantiene la fusión.

3.9 Síntesis de polimetilmetacrilato

Por sugerencia de [23] la manera más sencilla de sintetizar plexiglas es por medio del método de polimerización por adición, para llevar a cabo este proceso se requiere de una serie de materiales que se enlistan enseguida:

- 2 Kg. de poli metacrilato de metilo en pellets;
- 2 L. de monómero de metil metacrilato;
- 100 mg de peroxido de benzoílo.

Sin embargo el manejo de peroxido de benzoílo debe de llevarse a cabo con mucho cuidado [23] debido a que es un material volátil, esto es, existe riesgo a explosión por choque, fricción o fuego, además de que existe posibilidad de sensibilidad en contacto con la piel e irritación de los ojos.

El método de fabricación de elementos y piezas de PMMA consiste en lo siguiente [23].

Se debe de conseguir el molde para el elemento o pieza en cuestión, en este caso se decidió formar una semiesfera. Dentro del molde se vacían algunos mililitros de metacrilato de metilo y pellets, enseguida se agrega una punta de espátula de peroxido de benzoílo (iniciador). Se calienta el recipiente al baño María⁹ procurando que no hierva el contenido (aproximadamente 70° C), con el fin de evitar la formación de burbujas en la masa de reacción.

⁹ El concepto de baño María implica el calentamiento indirecto, por convección térmica del medio agua

3.10 Comparación entre diferentes opciones de fabricación de los elementos de plástico

Existen varios retos que hay que superar para poder fabricar piezas de plástico ópticamente viables. En particular en el proceso de síntesis por adición, si no se controla la temperatura del compuesto, existe la posibilidad de que se generen burbujas, esto es perjudicial para las transmisiones ópticas. En el moldeo por inyección o extrusión existe una limitante en las formas geométricas que se pueden crear por medio de estas técnicas.

El análisis de las tecnologías existentes realizado en este capítulo reveló la complejidad de la implementación en nuestras condiciones de las tecnologías existentes de síntesis de PMMA y piezas de este material, se tomó la decisión de utilizar en nuestro trabajo el material prefabricado: las barras y tubos de PMMA disponibles en el mercado, y se fabricaron por medio de diferentes procesos mecánicos (corte, pulido, etc.) los elementos ópticos de este material que son objeto de estudio del presente trabajo

Se analizaron algunos de los procesos de conformación de los plásticos, en la Tabla 3.3 se puede ver a grandes rasgos las principales características observadas .

Tabla 3.3 Comparativa entre algunos de los métodos de conformación de los plásticos.

Método	Polímeros mas utilizados	Ventajas	Desventajas
Moldeo por compresión	Termoplásticos	<ul style="list-style-type: none"> • Los costos del molde tienen tendencia a ser menores porque los moldes son más sencillos. • Las tareas de menos volumen se ajustan mejor al moldeo por compresión porque el arranque usualmente es más rápido, más fácil y genera menos chatarra. • Las duraciones del ciclo 	<ul style="list-style-type: none"> • Las piezas moldeadas por compresión usualmente son de más trabajo intensivo. Las preformas tienen que ser hechas, calentadas y cargadas en el molde por un operador o un robot. • Las rebabas de la línea de separación pueden ser más pesadas y más difíciles de extraer y la

		para las piezas moldeadas por compresión usando preformas precalentadas pueden ser menores que para las piezas de moldeo por inyección.	gravilla puede ocurrir como resultado de la extracción.
Moldeo por inyección	Termoplásticos	<ul style="list-style-type: none"> • El grado de automatización alcanzado con estas máquinas • La posibilidad para fabricar productos plásticos con tolerancias muy pequeñas • Versatilidad para el moldeo de una amplia gama de productos, tanto en formas como en materiales plásticos distintos 	<ul style="list-style-type: none"> • Hay una deficiente mezcla y homogeneización del polímero fundido. • Es difícil medir con exactitud la cantidad de material en cada ciclo de moldeo.
Extrusión	Termoplásticos	<ul style="list-style-type: none"> • Se puede extruir una gran variedad de formas, especialmente con extrusión • En algunas operaciones de extrusión se genera poco o ningún material de desperdicio. • Se generan piezas largas y de forma constante. 	<ul style="list-style-type: none"> • Una limitación es la geometría de la sección transversal que debe ser la misma a lo largo de toda la parte
