

Optical and physics differential characteristics of optical plastics

Características ópticas y físicas diferenciales de los plásticos ópticos

S. Bonaque-González^{1*}, O. Casanova-González¹, J.M. Trujillo-Sevilla¹, J.J. Fernández-Valdivia¹, A. Hernández-Delgado², D. Carmona-Ballester².

1. Woptix S.L. Tenerife. España

2. Universidad de La Laguna. Tenerife. España

(*) E-mail: sergio.bonaque.gonzalez@gmail.com

Received: 08/06/2017

Accepted: 23/03/2018

DOI: 10.7149/OPA.51.2.50010

ABSTRACT:

Optical organic materials, or optical plastics, are raising interest in recent decades thanks to advances in manufacturing processes. It is already common for these materials to be in optical systems, for example in the field of medicine or computer science. However, the characteristics of these compounds have not been as studied as in the case of glasses, and the little available information is widely dispersed. The present revision article tries to compile those most interesting **optical and physics** differential characteristics of the optical plastics, from the point of view of an optical engineer which must face the design of an optical system.

Key words: Optical plastic, organic optics, polymer, PMMA

RESUMEN:

Los materiales ópticos orgánicos, o plásticos ópticos, están experimentando un auge en las últimas décadas gracias a los avances en los procesos de fabricación. Es ya habitual que estos materiales estén en sistemas ópticos del campo de la medicina o de la informática. Sin embargo, las características de estos compuestos no han sido tan estudiadas como en el caso de los vidrios, estando además muy dispersa la poca información disponible. El presente artículo de revisión trata de aunar aquellas características ópticas y físicas diferenciales de los plásticos ópticos más interesantes desde el punto de vista de un ingeniero óptico que debe enfrentarse al diseño de un sistema óptico.

Palabras clave: Plásticos ópticos, óptica orgánica, polímeros, PMMA

REFERENCES AND LINKS / REFERENCIAS Y ENLACES

- [1] M.P. Schaub, *The design of plastic optical systems*. SPIE Press (2009).
- [2] L.T. Huang, Y.C. Cheng, C.Y. Wang, P.J. Wang, "Wavefront measurement of plastic lenses for mobile-phone applications," *Adv. Opt. Technol.* **5**(4), 343–349 (2016).
- [3] A. Voznesenskaya, L. Andreev, A. Ekimenkova, "Development of surgical binoculars on the basis of polymeric lenses," in *Current Developments in Lens Design and Optical Engineering XVIII*, 10375, 1037514. SPIE Press (2017).
- [4] Y. Qin, H. Hua, M. Nguyen, "Multiresolution foveated laparoscope with high resolvability," *Opt. Lett.* **38**(13), 2191–2193, (2013).
- [5] J. Davis, "A polycarbonate ophthalmic-prescription lens series," *Am J Optom Physiol Opt.* **55**(8), 543–52, (1978).
- [6] Y. Sun, C. Papin, V. Azorin-Peris, R. Kalawsky, S. Greenwald, S. Hu, "Use of ambient light in remote photoplethysmographic systems: comparison between a high-performance camera and a low-cost webcam," *J. Biomed. Opt.* **17**(3), 037005 (2012).

- [7] S. Lampman, *Characterization and failure analysis of plastics*. ASM International (2003).
- [8] S. Bäumer, *Handbook of Plastic Optics*, John Wiley & Sons, (2011).
- [9] *Óptica oftálmica. Lentes para gafas. Requisitos fundamentales para las lentes terminadas sin biselar*. UNE-EN ISO14889 (2014).
- [10] *Implantes oftálmicos. Lentes intraoculares*. UNE-EN ISO 11979-8 (2017).
- [11] H. D. Burns, "Outgassing Test for Non-Metallic Materials Associated with Sensitive Optical Surfaces in a Space Environment." MSFC-SPEC-1443 (1987).
- [12] *ASTM D1003-11 Standard Test Method for Haze and Luminous Transmittance of Transparent Plastics*. ASTM (2011).
- [13] *ASTM D2457: Specular Gloss of Plastic Films and Solid Plastics*. ASTM (2008).
- [14] A.Y. Yi, "Optical Fabrication". *The Optics Encyclopedia* (2007).
- [15] H. Ottevaere, R. Cox, H.P. Herzig, T. Miyashita, K. Naessens, M. Taghizadeh, H. Thienpont "Comparing glass and plastic refractive microlenses fabricated with different technologies," *J. Opt. A Pure Appl. Opt.*, **8**(7), S407 (2006).
- [16] Y. Dai, H. Ohmori, W. Lin, T. Suzuki, H. Eto, N. Ebizuka, A. Makinouchi, "Fabrication technique for large mirrors." In *International Progress on Advanced Optics and Sensors*, **40**, 119, (2003).
- [17] U. Greis, G. Kirchhof, "Injection Molding Of Plastic Optics," *Optical Surface Technology*, **381**, 69-78. SPIE Press, (1983).
- [18] C. H. Wu, W. S. Chen, "Injection molding and injection compression molding of three-beam grating of DVD pickup lens," *Sensors and Actuators A: Physical*, **125**(2), 367-375 (2006).
- [19] M. T. Gale, "Replication," in *Micro-Optics Elements, Systems and Applications*. CRC Press (1997).
- [20] U. Schulz, U.B. Schallenberg, & N. Kaiser, "Antireflection coating design for plastic optics," *Appl. Opt.*, **41**(16), 3107-3110 (2002).
- [21] A. Ahmad, *Handbook of Optomechanical Engineering*. CRC Press (1996).
- [22] J. D. Lytle, "Polymer optics," in *Handbook of Optics*. The Optical Society of America (1995).
- [23] K. Kogler, "Selection of plastics for optical applications," *Adv. Mater. Process.* (1999).
- [24] "Página web de la empresa SCHOTT." [Online]. <http://www.schott.com>
- [25] G. Musgrave, A. Larsen, T. Sgobba. *Safety Design for Space Systems*. Butterworth-Heinemann (2009).
- [26] F. Su, K. Chian, & S. Yi, "An optical characterization technique for hygroscopic expansion of polymers and plastic packages," *Microelectron. Reliab.*, **46**, 600-609 (2006).
- [27] H.D. Wolpert, "Optical plastics: properties and tolerances," in *The photonics design and applications handbook*. Laurin Publishing Co (1991).
- [28] James E. Mark. *Physical Properties of Polymers Handbook*. Springer-Verlag (2007).
- [29] J. M. Cariou, J. Dugas, L. Martin, P. Michel, "Refractive-index variations with temperature of PMMA and polycarbonate," *Appl. Opt.*, **25**(3), 334-336 (1986).
- [30] T. Watanabe, N. Ooba, Y. Hida, M. Hikita, "Influence of humidity on refractive index of polymers for optical waveguide and its temperature dependence," *Appl. Phys. Lett.*, **72**(13), 1533-1535 (1998).
- [31] H. E. Lai, P. J. Wang, "Study of process parameters on optical qualities for injection-molded plastic lenses," *Appl. Opt.*, **47**(12), 2017-2027 (2008).
- [32] B. R.Hahn, J. H. Wendorff, "Compensation method for zero birefringence in oriented polymers," *Polymer*, **26**(11), 1619-1622 (1985).
- [33] W.S. Beich, "Plastic Optics: Specifying Injection-Molded Polymer Optics." [Online]. <http://https://www.photonics.com/EDU/Handbook.aspx?AID=25487>
- [34] *Outgassing Test for Materials Associated with Sensitive Surfaces Used in an Ambient Environment*. MSFC-SPEC-2223 (1993).
- [35] S. Aarya, K. Dev, S.K. Raghuvanshi, J.B.M. Krishna, M.A. Wahab, "Effect of gamma radiation on the structural and optical properties of Polyethyleneterephthalate (PET) polymer," *Radiat. Phys. Chem.*, **81**(4), 458-462 (2012).
- [36] "Página web de la empresa Mitsubishi." [Online]. http://www.m-ep.co.jp/en/pdf/product/iupi_nova/physicsity_06.pdf
- [37] J.W. Gooch. *Encyclopedic Dictionary of Polymers*. Springer (2011).

- [38] B.J. Todd, "Outgassing of glass," J. Appl. Phys., **26**(10), 1238-1243 (1955).
- [39] V.O. Altemose, "Outgassing of Glass Caused by Thermal Neutrons and Gamma Radiation," J. Am. Ceram. Soc., **49**(8), 446-450 (1966).
- [40] A. Fisher, B. Mermelstein, "A compilation of low outgassing polymeric materials normally recommended for GSFC cognizant spacecraft," NASA TM X-65705 (1971).
- [41] D. Sporea, A. Sporea, "Radiation Effects in Optical Materials and Photonic Devices," in Radiation Effects in Materials, InTech (2016).
- [42] K.J. Buschow, R.W. Cahn, M.C. Flemings, B. Ilshner, E.J. Kramer, S. Mahajan. *Encyclopedia of Materials: Science and Technology*. Elsevier (2001).
- [43] D. Ehrhart, & W. Vogel, "Radiation effects in glasses," Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. B Beam Interact. with Mater. **65**(1), 1-8 (1992).
- [44] G.L. Chen, C.Y. Lee, A. Yuan, P. Chang, "Optical Design for Three Mega Pixel Mobile Phone Camera," in Proceedings of the 35th International MATADOR Conference, 71-74 (2007).

1. Introducción

Aunque la primera patente sobre lentes de plástico se atribuye a Koch de Gooreynd alrededor del año 1936 [1], el inicio del desarrollo de la óptica orgánica de precisión podría fijarse en el año 1940 cuando la empresa "Columbia Southern Chemical Company" desarrolló el compuesto CR-39, un material sintético no termoplástico, a partir del monómero "alil-diglicol-carbonato" conocido como "ADC". Este compuesto resultó tener aplicaciones en la fabricación de lentes oftálmicas por su conveniente índice de refracción, siendo un material menos resistente a la abrasión que el vidrio, pero con propiedades ópticas muy semejantes.

A partir de este material han surgido más materiales sintéticos de aspecto similar al vidrio, formados principalmente por compuestos orgánicos macromoleculares. A pesar de que la variedad de materiales orgánicos útiles para la fabricación de óptica sigue siendo limitada, su número se ha ido incrementando en las últimas décadas y la posibilidad de sustituir lentes inorgánicas por lentes orgánicas de menor peso y coste en sistemas ópticos está atrayendo la atención de los ingenieros [2, 3]. Por ello, el uso de lentes orgánicas en sistemas ópticos se ha extendido en campos como la medicina (laparoscopios, artroscopios, citoscopios)[4], sistemas correctores de la visión (gafas oftálmicas, lentes intraoculares, microscopios quirúrgicos) [3], [5], pantallas de información, o productos informáticos (webcams, sistemas de detección de códigos de barras)[6]. A modo de ejemplo, la tabla 1 adaptada de [1,7,8] muestra algunas características de plásticos ópticos de uso común.

Una óptica adecuada para cierta aplicación puede ser sub-óptima para otra. Por ello no existen parámetros o propiedades generales que se deban cumplir para todos los plásticos ópticos, siendo normalmente el usuario final el que marque los requerimientos necesarios que deben satisfacer los elementos de su sistema óptico. Sí que existen regulaciones específicas para aplicaciones muy concretas, como por ejemplo en el campo de la salud o tecnología espacial. Por citar algunos ejemplos representativos, la norma UNE-EN ISO 14889:2014 regula las tolerancias de fabricación, principalmente focales y radios, de lentes oftálmicas monofocales [9]; la norma UNE-EN ISO 11979 regula las tolerancias en la fabricación de lentes intraoculares, así como la metodología para obtener ciertas propiedades [10]; la norma MSFC-SPEC-2223 regula la tolerancia de gasificación para materiales de uso espacial [11]. También existen numerosas normas para la medición estandarizada de ciertas características, como por ejemplo la norma ASTM D1003 [12] que regula el método de medición de la turbidez del material (usualmente conocida por su término en inglés *haze*) o la norma ASTM D2457 [13], que determina el método de medición del brillo especular. La referencia [7] es un excelente libro que detalla muchos de estos procedimientos normalizados para la medición de numerosas características.

Sin embargo, los fabricantes de lentes plásticas no proporcionan tanta información como en el caso de los vidrios, estando la información acerca de su comportamiento óptico un tanto dispersa. Uno de los motivos podría tener origen en el escaso volumen de negocio que representan las lentes para la industria del plástico. El presente trabajo de revisión trata de resumir algunas de las características ópticas y físicas diferenciales de las lentes orgánicas o plásticos ópticos. Las características mecánicas tales como propiedades de tracción, compresión o flexión, entre otras, quedan fuera del alcance de este trabajo de revisión.

TABLA 1: Características de algunos materiales ópticos. Adaptado [1,7,8].

	Polimetilmetacrilato (PMMA)	Copolímero de olefina cíclica (COC)	Poliestireno	Polycarbonato	N-BK7 (vidrio)
Temperatura de servicio (°C)	85	150	75	120	557
Coefficiente de expansión termal (°C ⁻¹)	60·10 ⁻⁶	60·10 ⁻⁶	50·10 ⁻⁶	68·10 ⁻⁶	7.1·10 ⁻⁶
dn/dt (°C ⁻¹)	-105·10 ⁻⁶	-101·10 ⁻⁶	-140·10 ⁻⁶	-107·10 ⁻⁶	3·10 ⁻⁶
Densidad (g/cm ³)	1.16	1.02	1.05	1.2	2.51
Conductividad térmica (W/m·K)	0.2	0.16	0.17	0.2	1.114
Calor específico (W·s/Kg·K)	1.4	No disponible	No disponible	1.2	858
Difusividad termica m ² /s	0.13	No disponible	No disponible	0.44	0.5
Índice de refracción	1.49	1.54	1.57	1.586	1.51
Número de Abbe	58	56	30.8		63.96
Absorción de agua *	0.3	0.01	0.2	0.15	-
Birrefringencia (escala 1-10)	4	2	10	7	1

* Después de inmerso 24 horas a 23 °C.

2. Fabricación

Algunas de las características de las lentes orgánicas solo pueden ser bien entendidas si se conoce el proceso de fabricación. Las lentes plásticas se fabrican mayoritariamente por moldeo [1,14], si bien para algunos casos especiales como lentes muy grandes o muy pequeñas existen otras técnicas alternativas [15,16]. La técnica de moldeo permite un alto volumen de producción cuando se compara con las lentes inorgánicas, lo que lleva asociado un abaratamiento de los costes de producción. Unido a que el moldeo además permite una alta repetitividad, otros métodos como el torneado o el tallado, más usuales en los vidrios, se utilizan solo en aplicaciones muy concretas. El moldeo es sin embargo una técnica muy compleja y un campo activo de investigación donde el número de parámetros que influyen en el proceso puede ser inusitadamente alto [17]. Dentro del moldeo existen varias modalidades, como el moldeo por inyección, por compresión o técnicas híbridas [18]. El moldeo por inyección permite fabricar varias lentes al mismo tiempo y es la técnica más frecuente cuando se necesitan optimizar costes. Una determinada cantidad de monómero es inyectada dentro de un molde donde se solidifica al polimerizarse dando lugar así a una lente orgánica. A diferencia del anterior, en el moldeo por compresión el material es introducido y presionado entre dos platinas calientes que mediante ciclos de temperatura y presión le proporcionan al material la forma deseada al polimerizarse. Se utiliza principalmente en aquellos casos donde el detalle superficial es extremadamente importante, como en las lentes de Fresnel o en estructuras (“arrays”) lenticulares [18]. En la forma de moldeo mixta, también conocida como acuñado (“coining”), el material es inyectado en un molde parcialmente abierto que a su vez va ejerciendo presión durante diferentes ciclos hasta cerrarse por completo mientras se realizan ciclos de temperatura. Proporciona superficies de muy alta calidad y repetitividad [1], con el inconveniente de un proceso más largo y costoso.

Todas las técnicas de moldeo tienen en común que poseen una alta repetitividad. Sin embargo, las tolerancias específicas dependen fuertemente de la geometría, tamaño, material y diseño de moldes, entre otros. Por estas razones, los rangos de tolerancia dependerán de cada fabricante en concreto. Bäumer [8] proporciona una tabla que recoge los órdenes de magnitud que se manejaban en la industria en el año 2011 (tabla 2). Una de las mayores ventajas de las técnicas de moldeo es que permiten fabricar, de manera relativamente sencilla y barata, lentes de geometrías no esféricas o asimétricas. Esto permite que, por ejemplo, el coste de una lente plástica asférica no sea superior al de una esférica, al contrario de lo que

ocurre con los vidrios. Además, el proceso de moldeo beneficia las superficies curvas, ya que estas proporcionan más soporte estructural durante este [1], al contrario que en las lentes de vidrio donde el proceso de manufactura favorece la fabricación de lentes con una de sus superficies con geometría plana.

En el capítulo 3 de [1] así como [19] se detallan en mayor profundidad estos procesos de fabricación.

3. Recubrimientos

Los recubrimientos de los plásticos ópticos se utilizan típicamente para mejorar su óptica, por ejemplo reduciendo los reflejos de la superficie, o para mejorar las propiedades mecánicas o químicas. Para ello, se pueden añadir varias capas de recubrimiento. Entrar en los detalles de la metodología para realizar estos recubrimientos queda fuera del ámbito de este trabajo. No obstante, es llamativo que los mismos métodos que se utilizan para aplicar recubrimientos a los vidrios no son útiles en el caso de los plásticos ópticos, ya que requieren de altas temperaturas que pueden degradar el material. En el caso de los plásticos ópticos se utilizan métodos específicos como aquellos que incorporan el uso de pistolas de iones y plasmas [20,21]. Así mismo, los recubrimientos deben ser capaces de soportar los cambios dimensionales a los que se ven sometidos los plásticos ópticos derivados de oscilaciones en los factores ambientales, tal y como se verá más adelante. Si bien existen numerosos recubrimientos para los plásticos ópticos que pueden resultar interesantes para un ingeniero, su excesiva utilización puede encarecer notablemente el coste de una lente plástica, llegando a superar en ocasiones al coste de una lente de vidrio. Para los lectores interesados en información adicional sobre los recubrimientos en los plásticos ópticos, recomendamos el capítulo 6 de Schulz en [8].

TABLA 2: Tolerancias de fabricación en la industria. Adaptado de Bäumer [8].

	Bajo coste	Comercial	Estado del arte	Precisión
Focal (%)	±3-5	±2-3	±0.5-1	±0.5
Radio de curvatura (%)	±3-5	±2-3	±0.8-1.5	±0.3
Irregularidades (franjas/10 mm)	2.4-4	0.8-2.4	0.8-1.2	
Centrado	±3'	±2'	±1'	
Grosor central (mm)	±0.1	±0.05	±0.01	±0.015
Grosor del borde (mm)	±0.1	±0.05	±0.01	±0.015
Desplazamiento radial (mm)	0.1	0.05	0.02	
Repetitividad (%)	1-2	0.5-1	0.3-0.5	
Ratio diámetro/grosor	2:1	3:1	5:1	
Burbujas e inclusiones (ISO 10110-3)		1x0.16	1x0.10	1x0.06
Imperfecciones de la superficie (ISO 10110-6)		2x0.10	2x0.06	2x0.04

4. Propiedades físicas y térmicas

4.1. Temperatura de servicio

Se define temperatura de servicio como el rango dentro del cual un material no sufre una degradación irreversible de sus propiedades [1]. El límite superior de temperatura de servicio de los plásticos ópticos es del orden de 60 a 250°C, siendo substancialmente menor que en el caso de los vidrios, del orden de 400 a 700 °C [22]. Como ya se ha visto en el apartado anterior, esto influye enormemente en la metodología para aplicar los recubrimientos. Adicionalmente, dado que, por ejemplo, 60°C es una temperatura relativamente baja, el ingeniero debe tener en cuenta el material utilizado y las condiciones de uso para evitar degradaciones irreversibles de la óptica.

4.2. Conductividad térmica

La conductividad térmica es una propiedad física de los materiales que mide la capacidad de conducción de calor. En otras palabras, la conductividad térmica es también la capacidad de una sustancia de transferir la energía cinética de sus moléculas a otras adyacentes o a sustancias con las que está en contacto. La conductividad térmica de los plásticos ópticos es relativamente pequeña, con unos valores de entre 0.14 y 0.22 W/(K·m) [8]. Estos valores son aproximadamente 5 veces menores que los de los vidrios, implicando que los materiales plásticos son buenos aislantes, lo cual puede significar una ventaja (cuando el calor se

produce fuera del sistema óptico) o una desventaja (cuando el calor se produce dentro del sistema óptico y necesita ser disipado, p.e. por láseres o en tecnología espacial).

4.3. Calor específico

El calor específico es una magnitud física que se define como la cantidad de calor que hay que suministrar a la unidad de masa de una sustancia para elevar su temperatura en una unidad. Por tanto, a mayor valor de calor específico, mayor es el calor necesario para elevar la temperatura del material en una unidad de temperatura. Para los polímeros típicos usados para plásticos ópticos a presión atmosférica constante, el calor específico varía entre 1.2 y 1.97 kJ/(kg K), comparado con los vidrios que varían entre 0.75 y 0.85 kJ/(kg K) [23].

4.4. Difusividad térmica

La difusividad térmica es el valor de la conductividad térmica de un cierto material dividida entre el producto del valor de su densidad y la capacidad calorífica específica del mismo (en m^2/s). Es un índice que expresa la velocidad de cambio, y flujo de temperaturas, en un material hasta que alcanza el equilibrio térmico y es una buena medida para englobar a los parámetros térmicos citados en puntos previos 4.2 y 4.3. Un material A, con difusividad térmica mayor que otro B, alcanza el equilibrio en menor tiempo.

El orden de magnitud de la difusividad térmica para muchos de los plásticos ópticos más comunes se encuentra entre $0.07\text{-}0.36 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, siendo para los vidrios aproximadamente 5 veces mayor [7]. Dado que para los sistemas ópticos una distribución homogénea de la temperatura es la situación más idónea, un mayor valor sería el más adecuado para sistemas ópticos que sufran variaciones de temperatura.

4.5. Densidad

Los plásticos ópticos tienen una densidad que varía entre 0.83 a 1.4 g/cm^3 , mientras que en los vidrios puede variar entre 2.3 y 6.3 g/cm^3 [24]. Esto convierte a los plásticos ópticos en buenos candidatos para aplicaciones donde el peso de los componentes es un factor importante, como por ejemplo los microscopios quirúrgicos cuyo peso debe ser soportado por la cabeza del usuario.

4.6. Irregularidades de la superficie y contaminación

Las irregularidades tienden a afectar a calidad óptica de las lentes si son suficientemente grandes, mientras que si son microscópicas tienden a incrementar la dispersión del material (*scattering*), la cual puede ser cuantificada a través de la turbidez del mismo (*haze*). La cantidad de dispersión o turbidez de un material depende del grosor de la muestra, y por tanto un valor de turbidez debe estar asociado a un valor de grosor. Además, existen varios métodos para la cuantificación de esta propiedad y cada uno de ellos puede proporcionar valores distintos [1]. Es por tanto necesario incorporar el método de medida junto con el grosor de la muestra a los valores de turbidez. En general, existe turbidez tanto en plásticos ópticos como en vidrios, estando sus valores muy relacionados con el proceso de fabricación. En el caso de los plásticos ópticos, el porcentaje de turbidez puede oscilar entre un 2 y 12% para un grosor de 3 mm [24]. Sin embargo, Lampman S. [7], sugiere que los procesos de fabricación actuales son capaces de alcanzar cualquier precisión deseada, no existiendo por tanto una diferencia notable en este aspecto entre los plásticos ópticos y los vidrios.

4.7. Carga eléctrica

Típicamente, los plásticos ópticos son aislantes eléctricos muy efectivos [22]. Por tanto, son susceptibles de almacenar carga eléctrica en su superficie y de disiparla muy lentamente. Esta carga estática, si no es disipada, puede representar en determinados montajes un riesgo para los componentes eléctricos cercanos, además de atraer contaminantes de carga opuesta a la superficie de la lente. Esta característica puede ser de importancia en campos muy concretos como el de la tecnología espacial donde los componentes pueden cargarse eléctricamente durante el montaje, pero también durante la órbita, debido sobre todo a la interacción con partículas cargadas como el plasma [25]. Las descargas entre áreas con diferente carga eléctrica pueden afectar dramáticamente a las operaciones de un objeto en órbita, resultando en interferencias, daño de la instrumentación científica, comunicaciones, etc. Es importante conocer que existen tratamientos en forma de recubrimientos para mejorar este aspecto [26], si bien la adición de recubrimientos puede tener efectos indeseados como un aumento de la gasificación.

5. Propiedades ópticas

5.1. Índice de refracción.

El índice de refracción de un material es un escalar adimensional que representa el cociente entre la velocidad de la luz en el vacío y el medio que compone al material. Una de las mayores diferencias con respecto a las lentes de vidrio es que, mientras que en los catálogos de vidrios existe una amplia variabilidad de materiales que se diferencian en el 4º o 5º decimal del índice de refracción, en las lentes orgánicas los índices de refracción están notablemente más discretizados y raramente los fabricantes proporcionan más de 3 o 4 decimales. Esto podría suponer un problema durante el diseño de sistemas ópticos que requirieran de una muy alta precisión. Asimismo, mientras que en los vidrios pueden encontrarse materiales con índices de refracción superior a 2, en los plásticos ópticos los índices suelen variar entre 1.49, del CR-39, y 1.74, del material MR-174 [27].

En el diseño óptico con vidrios es una práctica común el incrementar el índice de refracción en elementos positivos y reducirlo en los negativos para buscar un balance entre las aberraciones del sistema y la curvatura de campo o de Petzval. En los elementos positivos, esto permite reducir la curvatura de campo así como reducir las aberraciones utilizando lentes con radios más grandes, lo que a su vez disminuye el ángulo de incidencia sobre la superficie de la lente. En los elementos negativos, si bien la curvatura de campo aumenta al disminuir el índice de refracción, las aberraciones disminuyen debido a que se pueden utilizar superficies con menor radio de curvatura. Dado las limitaciones de índices de refracción, materiales y la fuerte dependencia de las propiedades de los plásticos ópticos con la temperatura, como se vio en los apartados previos, es posible que no existan plásticos ópticos de alto índice que cumplan con los requerimientos deseados, lo que obliga a utilizar lentes más gruesas y con radios menores. En estos casos, aprovechar la alta disponibilidad de lentes esféricas que poseen los plásticos ópticos, pueden mitigar en parte este inconveniente.

5.1.1. Cambio del índice de refracción con la temperatura

La variación del índice de refracción con la temperatura (dn/dt) de los plásticos ópticos puede ser entre 6 y 50 veces más que en el caso de los vidrios [28]. Las razones no son claras y se ha sugerido que cambios en la densidad del material [29] o en el contenido en agua del material [30] pueden desempeñar un rol significativo. Mientras que en el caso de los vidrios esta variación del índice de refracción con la temperatura usualmente se puede despreciar, en el caso de los plásticos ópticos puede llegar a ser significativa, oscilando entre $-8.5 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ y $-14 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ dependiendo del material [8]. Por ejemplo, el plástico Polimetilmetacrilato (PMMA) tiene un dn/dt de $-8.5 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$, el acrílico de $-6 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$, mientras que el vidrio BK-7 tiene un valor de $+0.3 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$. Suponiendo un cambio en la temperatura de 40°C , el plástico PMMA sufriría un cambio en su índice de refracción de -0.0034 , el acrílico de -0.0024 , mientras que el vidrio BK-7 de 0.00012 . A pesar de que el valor de dn/dt se representa con un escalar, se ha demostrado que el comportamiento no es completamente lineal [7]. Es llamativo que en los plásticos ópticos el valor es negativo (cuando la temperatura aumenta, el índice de refracción disminuye), al contrario que en los vidrios que suele ser positivo.

5.1.2. Variaciones del índice de refracción con la humedad

Un efecto inesperado, por inexistente en la óptica inorgánica, presente en los plásticos ópticos y directamente relacionado con el apartado anterior es el cambio en el índice de refracción con la humedad, que además ocurre en forma de gradiente. La humedad puede absorberse de manera asimétrica, creando compresión, estrés en el material, y un gradiente de índice. Estos cambios no están bien documentados, aunque se estima que para el PMMA se produce un cambio en una unidad o dos en el tercer decimal del índice de refracción y que cuando el material está saturado, el gradiente desaparece [7].

5.2. Número de Abbe

El número de Abbe representa la variación del índice de refracción con la longitud de onda y es una medida de la dispersión del material. Cuanto mayor sea el número de Abbe, menos dispersión tendrá una lente y mejor será su calidad. Al igual que en el caso del índice de refracción, la relativa escasez de materiales ópticos plásticos implica que haya poca variedad en cuanto a este parámetro. Se puede establecer que como regla general el número de Abbe de una lente orgánica varía entre 20 y 64, con valores muy discretizados [27]. Para el caso de los vidrios, la oferta es moderadamente más variada. Por ejemplo, consultando el catálogo de la casa SCHOTT [24], pueden obtenerse vidrios con números de Abbe que oscilan entre 22 y 84. Para intentar compensar esta diferencia cuando se diseña un sistema con plásticos ópticos, puede optarse

por utilizar distintas geometrías para compensar números de Abbe más reducidos o el uso de dobletes acromáticos. Sin embargo, los dobletes de plástico cementados aunque pueden ser fabricados no son la norma, por lo que esto puede significar un incremento indeseado de la longitud del sistema, lo que puede ser de importancia en determinados montajes donde una longitud reducida es un requerimiento (p.e. cámaras de teléfonos).

5.3. Birrefringencia

La birrefringencia es una dependencia del índice de refracción con el estado de polarización de la luz que pasa a través del material. Prácticamente todos los plásticos ópticos tienen birrefringencia, estando su aparición asociada al proceso de fabricación y a la estructura interna del material [7,31]. Si bien es cierto que existen a nivel experimental plásticos ópticos que muestran grados despreciables de birrefringencia o que se puede disminuir mucho la birrefringencia mediante ciertas técnicas durante el proceso de fabricación [32], estos compuestos no están extendidos comercialmente. Para el ingeniero que diseña un sistema en el que la polarización es importante, la birrefringencia puede ser un problema además de que no es un parámetro que suela ser especificado en los plásticos ópticos. Aunque la mayoría de vidrios también muestran valores de birrefringencia, igualmente asociados a tensiones internas del material generadas durante el proceso de fabricación, es posible disminuir esta propiedad prácticamente a demanda. Según el método cualitativo propuesto por Beich [33], en el que clasifica distintos materiales en una escala del uno al diez, siendo 1 un material con la mínima birrefringencia, el vidrio BK7 tendría un valor de 1, mientras que plásticos ópticos comunes como el Poliester, PMMA, Policarbonato y estireno tendrían un valor de 2, 4,7 y 10 respectivamente.

5.4. Fluorescencia

La fluorescencia es un tipo particular de luminiscencia, que caracteriza a las sustancias que son capaces de absorber energía en forma de radiaciones electromagnéticas y luego emitir parte de esa energía en forma de radiación electromagnética de longitud de onda diferente. Típicamente, los polímeros exhiben algún grado de fluorescencia si se someten a radiación de suficiente energía [34]. Esta característica es frecuente también en los vidrios ópticos, en cuyo caso es despreciable para la mayoría de aplicaciones [35]. Dos materiales pueden mostrar unas características de fluorescencia muy diferentes a pesar de tener composiciones muy parecidas. No hemos encontrado bibliografía en cuanto a la fluorescencia de plásticos ópticos en concreto, por ello pensamos que es probablemente muy pequeña. No obstante el diseñador del sistema óptico debe estudiar si algún nivel de fluorescencia puede afectar a los objetivos que se pretenden alcanzar, eligiendo y estudiando el material a utilizar de acuerdo con sus requerimientos.

5.5. Ancho de banda

El ancho de banda es una manera de representar la transmisividad de una lente a distintas longitudes de onda. Al contrario que en los vidrios, donde se pueden encontrar anchos de banda muy diversos, los plásticos ópticos se limitan normalmente a aplicaciones en el visible, ya que la mayoría son absorbentes en la porción azul del espectro, con bandas absorbentes sobre 900 nm, 1150 nm, 1350 nm, y siendo opacos a partir de 2100 nm [8, 28]. La similitud en los espectros de absorción de la mayoría de plásticos ópticos puede ser atribuida a su similitud en su estructura molecular. Sin embargo, actualmente existen formulaciones especiales, como variantes del PMMA, que pueden tener transmisión hasta 300 nm [8, 28].

6. Variaciones frente a agentes externos

6.1. Variaciones dimensionales por humedad

Al contrario que en el caso de los vidrios, la mayoría de materiales plásticos son higroscópicos, es decir, absorben y retienen el agua, aunque este efecto es susceptible de disminuirse drásticamente con el uso de recubrimientos [22]. La problemática que esta característica implica es compleja y puede provocar cambios dimensionales, cambios menores en la transmisión espectral de la lente y, si el sistema debe estar en condiciones de vacío, puede provocar gasificación y ocasionalmente dañar el resto de sistemas [8]. Por ello, un sistema óptico que incorpore óptica orgánica en su diseño debe tener en cuenta las condiciones finales de humedad en las que va a funcionar.

Para la mayor parte de los materiales plásticos, los parámetros de absorción de agua y de saturación son suministrados por el fabricante. A modo de ejemplo, la tabla 3, adaptada de la página web del fabricante Mitsubishi [36] muestra algunos ejemplos de absorción de agua por distintos de sus materiales plásticos,

aunque no citan el procedimiento de medida. Sin embargo, puede ser más interesante para el ingeniero óptico el coeficiente de expansión debido a la humedad. Este coeficiente es medido como la diferencia entre el contenido de agua y la expansión entre dos estados de equilibrio (saturado y con el mínimo contenido en agua), aunque también existen otras definiciones [26]. La bibliografía disponible sobre el coeficiente de expansión de los plásticos ópticos es muy escasa aunque, por ejemplo, sí se ha medido para el caso del PMMA, siendo del orden de 0.5% [22], lo que puede ser útil para tener una idea del orden de magnitud de este parámetro en los plásticos ópticos. No hemos podido encontrar bibliografía que detalle si esta variación dimensional se produce de manera simétrica o asimétrica, aunque sí se ha sugerido que una vez que el material está saturado, el mismo se estabiliza [22].

TABLA 3: Tasa de absorción de agua de algunos materiales. Adaptada de [11].

Nombre de la sustancia	Tasa de absorción de agua (%)
Polietileno de baja densidad	<0.01
Policarbonato	0.23
PVC	0.07-0.2
Celulosa propionato	1.2-2.8
ABS resistente a impactos	0.3
Etilcelulosa resistente a impactos	0.8-2.0
Etilcelulosa	1.2-2.0
Nylon reforzado con vidrio	0.7-1.4
Polietileno	0.04-0.08
Nilon	1.2-2.3

6.2. Variaciones dimensionales con la temperatura

Como se vio en el punto 5.1, los plásticos ópticos sufren una variación del índice de refracción con la temperatura. Además de este cambio, también se produce un cambio en la longitud y volumen de los materiales. El coeficiente de dilatación térmica es el cociente que mide el cambio relativo de longitud o volumen que se produce cuando un cuerpo sólido o un fluido dentro de un recipiente cambian de temperatura (típicamente expresado en unidades de °C⁻¹):

$$\alpha = \frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right) \quad (1)$$

Por lo general, los distintos materiales se dilatan al calentarlos y se contraen al enfriarlos. Normalmente se supone que el coeficiente de dilatación térmica es constante (es decir, su valor no varía con la temperatura, o lo que es igual, existe una relación lineal de proporcionalidad entre los incrementos de temperatura y los incrementos de longitud), lo cual no es estrictamente cierto, aunque para un gran número de aplicaciones es una aproximación perfectamente asumible.

El coeficiente de dilatación térmica es mayor en los plásticos ópticos que en los vidrios en aproximadamente un orden de magnitud [28, 33]. Por ejemplo, para el PMMA tiene un valor de $7 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ mientras que para el BK7 es $0.71 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$. Esta expansión térmica, aunque reducida, puede ser importante ya que puede cambiar curvaturas, distancias focales, etc. Por ejemplo, se ha estimado que para un cambio de temperatura de 50°C el cambio en la distancia focal de una lente de 25.4 mm de diámetro y 50.8 mm de focal es de 0.681 mm para una lente de acrílico mientras que sería de 0.002 mm para una lente de BK7 [1]. Es por ello que deberá establecerse muy bien el rango de temperaturas a las que funcionará el sistema óptico y diseñar el mismo en función de estas. Si el rango esperado es alto y se espera una variación significativa, una buena estrategia es realizar un sistema mixto (con plásticos ópticos y vidrios), donde los elementos más críticos estén conformados por materiales de vidrio con un coeficiente de dilatación bajo.

6.3. Resistencia al rayado

Las lentes orgánicas son materiales blandos que, aunque absorben con facilidad los impactos son muy sensibles al rayado [27, 37]. Dado que el montaje de un sistema óptico puede realizarse en entornos controlados, esta característica no es necesariamente de importancia. No obstante, en sistemas donde las lentes sean susceptibles de atraer partículas y que requieran de limpiezas frecuentes, esta sensibilidad al rayado debería tenerse en cuenta en el momento del diseño del sistema o valorar la adición de recubrimientos específicos.

6.4. Gasificación

Los plásticos ópticos suelen contener materiales como lubricantes, colorantes, y estabilizadores, entre otros, en forma de recubrimientos que pueden provocar gasificación en un entorno de vacío. Esta gasificación podría convertir a estos materiales en no aptos para numerosas aplicaciones, dado que los materiales gasificados tienden a depositarse en superficies críticas. En el caso de los vidrios, la mayor parte de la gasificación es producida por la humedad almacenada [38], por incidencia de neutrones y por radiación gamma [39].

No hemos encontrado en la bibliografía estudios que evalúen esta característica en plásticos ópticos. Sin embargo, la NASA ha desarrollado un listado específico de plásticos (no necesariamente plásticos ópticos) con baja gasificación cuyo uso ha sido aprobado para su uso espacial, donde se puede encontrar, entre otros, el PMMA y varios tipos de policarbonato [40]. Para que un material sea aprobado para su uso espacial es necesario que la pérdida total de masa sea menor al 1.0% y que el CVCM (*Collected Volatile Condensable Material*) sea menor al 0.1 %. El CVCM se refiere a la cantidad de material emitido por una muestra colocada sobre una superficie a 125°C y recolectado a 25°C después de un periodo de 24 horas [11, 34]. Por tanto, es de esperar que estos materiales y otros similares tengan poca gasificación en ausencia de recubrimientos adicionales.

6.5. Efectos de la radiación

Los plásticos ópticos son susceptibles a la radiación ya que la radiación ultravioleta (UV) e ionizante pueden inducir cambios a nivel de las cadenas de los polímeros, modificando las propiedades estructurales, eléctricas, ópticas y químicas del polímero [35]. Típicamente, aquellos polímeros más susceptibles a la radiación UV son más tolerantes a la radiación ionizante y viceversa [35, 41]. La degradación dependerá de la particularidad química del polímero, siendo las principales consecuencias de esta degradación la coloración o decoloración del material, una absorción no uniforme de la energía, una disminución de la transmisibilidad y la gasificación [42]. No obstante, es posible dopar al polímero con diversas sustancias para mitigar los efectos de la radiación [43].

Los vidrios también se ven afectados por la radiación [41, 43]. Sin embargo, la industria del vidrio óptico está más avanzada tecnológicamente y en la actualidad existen numerosos materiales con una alta resistencia a la radiación.

7. Conclusiones

El presente trabajo se ha elaborado con el objetivo de resumir algunos aspectos diferenciales de la óptica orgánica. Actualmente la industria de los vidrios se encuentra en un estado de desarrollo más avanzado que la de los plásticos ópticos, ofreciendo mayor precisión en la fabricación y mayor estabilidad en el producto final [1]. Los plásticos ópticos poseen una serie de características no deseadas en un componente de un sistema óptico, aunque los avances en los recubrimientos están consiguiendo mitigar algunas de ellas [8]. Hay que tener en cuenta que no existe un único material que resuelva todos los problemas de diseño óptico. Las características a valorar incluyen parámetros ópticos, coste y niveles de precisión en la fabricación. Algunos sistemas obtienen muchas ventajas si se construyen con vidrios, otros sistemas cumplen mejor sus funciones si solo se incluyen plásticos ópticos, y otros sistemas pueden obtener ventajas de ambos tipos de elementos ópticos utilizados a la vez.

La disminución del coste y el peso del sistema es la ventaja más clara al utilizar lentes orgánicas, sin embargo, existen otras ventajas añadidas. Por ejemplo, las diferentes técnicas de moldeo que se emplean en la actualidad permiten la fabricación de lentes esféricas de forma económica [1]. El prudente emplazamiento de una lente esférica en algunos diseños puede reducir la necesidad del número de elementos y relajar las necesidades de fabricación en otros. Asimismo, la precisión en el tallado del plástico elimina restricciones de diseño de lentes y, por ejemplo, es posible la fabricación de lentes difractivas o con diseños complejos [1].

Como contrapartida, los materiales plásticos tienen varios inconvenientes. Dado la alta dependencia de las propiedades ópticas con los factores ambientales (humedad y temperatura), la elección del material queda fuertemente ligada al entorno donde debe funcionar el sistema, lo que a su vez limitará el rango de índices de refracción disponibles [8, 22, 28]. Utilizando únicamente lentes plásticas difícilmente se podrá construir un sistema que no cambie sus características con la temperatura. Por esta razón, los ingenieros suelen

utilizar sistemas mixtos donde la focal de los mismos recae principalmente sobre lentes de vidrio muy estables y utilizando lentes plásticas para realizar una corrección de las aberraciones [1,8]. Sin embargo, en sistemas que no requieren de una alta precisión, la óptica orgánica ha demostrado ser de utilidad. Este es el caso de las cámaras de los dispositivos móviles, cuyo funcionamiento se mantiene estable en un amplio rango de condiciones ambientales [44]. Por otra parte, los materiales plásticos sufren normalmente birrefringencia, a pesar de que continuamente se realizan avances en el campo de los materiales y el procesado de los mismos para reducirla [33]. Por ello, cuando el control de la polarización debe ser estricto, los componentes orgánicos que se emplazan en el sistema deben ser estudiados con precaución.