

Capítulo 16

Lentes de protección a las radiaciones

L. Guisasola

16.1 Radiaciones nocivas para el ojo

Existen múltiples radiaciones procedentes de fuentes artificiales que pueden resultar nocivas para el ser humano; sin embargo, en este capítulo tan sólo nos vamos a centrar en los efectos de la radiación solar. La radiación natural procedente del sol se denomina radiación electromagnética ya que está constituida por un campo eléctrico y un campo magnético que vibran perpendicularmente entre sí y perpendicularmente a la dirección de propagación.

A pesar de que la totalidad del espectro electromagnético está constituido por los rayos cósmicos, γ , X, la radiación ultravioleta (UV), visible (VS), infrarroja (IR), las microondas y las ondas de radiofrecuencia, nos centraremos sólo en las radiaciones denominadas no ionizantes, ya que son las que tienen un efecto más directo sobre el ser humano y en concreto sobre su globo ocular (figura 16.1).

231

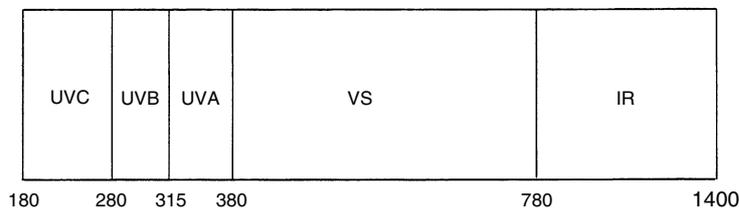


Fig. 16.1 Radiaciones no ionizantes del espectro solar

La radiación solar no ionizante está constituida (según la Normativa Europea EN 165:1993) por la radiación ultravioleta que comprende las longitudes de onda (λ) entre 180 nm y 380 nm, la radiación visible entre los 380 nm y los 780 nm y la del infrarrojo cercano que incluye las λ largas entre 780nm y 900 nm.

La radiación ultravioleta UV (invisible al ojo humano) a su vez se considera dividida en tres zonas: UVC o lejano que comprende las λ entre 180 nm y 280 nm, el UVB o medio que comprende las longitudes de onda λ entre 280 nm y 315 nm, y el UVA o cercano que comprende las λ entre 315 nm y 380 nm. Estas radiaciones son emitidas en grandes cantidades por el sol y, aunque en gran parte son filtradas por la atmósfera, es conveniente protegerse de ellas ya que en condiciones diferentes de las habituales pueden producir lesiones oculares.

La radiación visible (VS) se puede definir como aquella en que cada una de las longitudes de onda (λ) que la componen se traduce en una sensación visual de color distinta.

La última zona que estudiaremos es la correspondiente a la radiación infrarroja cercana (IR). Aunque el Sol emite una elevada proporción de radiación IR (60%) una gran cantidad de ésta y sobre todo las radiaciones superiores a 900 nm, son absorbidas por el dióxido de carbono y el vapor de agua de la atmósfera.

Tanto la piel como los ojos del ser humano son susceptibles de resultar dañados si se someten a elevadas intensidades o a prolongadas exposiciones de radiación.

El ojo cuenta con mecanismos naturales de protección tales como los párpados o el iris, que actúan cerrándose cuando la intensidad de radiación que incide les resulta excesiva; sin embargo, estos mecanismos tan sólo se activan con la radiación visible y no con la invisible, de ahí la necesidad de protegerlos.

Podemos clasificar las lesiones oculares según si se deben a efectos *térmicos* y *fotoquímicos* de los que son responsables las radiaciones UV y IR, y *fisiológicos*, tales como la fatiga muscular o el deslumbramiento causados por la radiación VS.

16.2 Necesidad de protección frente a la radiación

En este apartado se presentan las causas por las que se precisa protección a la radiación, según la zona del espectro, ya sea radiación UV, VS o IR.

232

a) Necesidad de protección frente a la *radiación UV*: la mayor parte de la radiación ultravioleta y sobre todo la correspondiente al UVC (lejano) es filtrada por componentes de la atmósfera tales como el oxígeno, el ozono, el dióxido de carbono, el vapor de agua y el polvo, con lo que la cantidad que llega a nosotros apenas supone peligro.

Sin embargo, la radiación correspondiente al UVB (medio) y UVA (cercano) sólo es parcialmente filtrada por la capa de ozono de la atmósfera. Debido al progresivo deterioro al que está siendo sometida, este filtro natural va desapareciendo y permitiendo que esta radiación altamente nociva llegue a la Tierra. La córnea y el cristalino constituyen una protección natural frente a la radiación UV. La córnea absorbe las λ inferiores a 290 nm y el cristalino las radiaciones inferiores a 350 nm; en consecuencia, estos medios son susceptibles de ser lesionados por estas radiaciones cuando se superan los límites normales de incidencia. El humor acuoso también contribuye a absorber gran parte de la radiación UV que deja pasar la córnea.

Conviene en consecuencia evitar el paso de los UVB y UVA hacia los ojos mediante la utilización de lentes filtrantes cuya transmisión en esa franja del espectro sea nula.

Los elementos que actúan como filtrantes de esta radiación son óxidos metálicos que se encuentran incorporados en la propia masa de las lentes y esta composición es completamente independiente de su color. Una lente totalmente transparente puede filtrar la radiación invisible en su totalidad y una lente con una baja transmisión en la zona visible y, por tanto, de coloración oscura puede, sin embargo, permitir el paso de radiaciones correspondientes a la franja del UV, con lo que el ojo queda desprotegido frente a esta radiación. De ambos ejemplos se desprende que de ningún modo una coloración oscura puede resultar sinónimo de elevada protección al UV.

b) Necesidad de protección frente a la *radiación VS*: la zona visible del espectro que el ojo percibe en forma de sensación de color no es especialmente dañina ni perjudicial en sí; sin embargo, elevadas intensidades de luz visible pueden resultar en extremo molestas e incluso peligrosas en caso de deslumbramiento. La luz azul es la principal causante del efecto de deslumbramiento, de la escasa per-

cepción de los contrastes y, en suma, de la sensación de visión borrosa, ya que esta luz se difunde con gran facilidad en el polvo y el vapor de agua ambiental. Sin embargo, el pigmento macular atenúa la región azul de la radiación visible antes de llegar a la retina.

El cristalino es el principal responsable de las pérdidas de luz por absorción en el visible y esta absorción es más importante en el azul que en el amarillo y aumenta con la edad. Este aspecto contribuye a aumentar la sensación de visión borrosa.

Así la segunda finalidad de un filtro es la de atenuar de forma selectiva la radiación correspondiente a la zona visible del espectro. Esta atenuación está directamente relacionada con su color. El filtro presenta el color de la radiación que mayoritariamente transmite, y dentro de cada color la tonalidad más o menos oscura nos informa del porcentaje de transmisión en el visible. A diferencia del caso del UV, el color y la tonalidad son indicativos de en qué medida ese filtro puede atenuar la radiación visible.

De forma específica, los denominados filtros polarizantes atenúan la radiación visible que se refleja en un plano único (normalmente el plano horizontal). Este tipo de luz denominada polarizada se encuentra principalmente en los ambientes de nieve, mar, arena o asfalto.

c) Necesidad de protección frente a la *radiación IR*: la radiación infrarroja que llega a la Tierra procedente del Sol es poco perjudicial, por lo que no es esencial que una lente de protección solar filtre también las λ largas del espectro.

Sin embargo, este tipo de protección es imprescindible frente a fuentes artificiales de radiación, capaces de emitir elevadas intensidades de radiación infrarroja. Así en todo aquellos puestos de trabajo sometidos a fuentes, tales como soldadores, hornos, etc., son de vital importancia las pantallas de protección casi exclusiva al infrarrojo.

La parte posterior del iris tiene propiedades absorbentes de la radiación caliente del final de los rojos (IR cercano) y, en consecuencia, esta zona es susceptible de resultar dañada por esta radiación.

16.3 Propiedades de los filtros de protección solar

Propiedades ópticas

a) *Transmisión*. Para conocer el porcentaje de transmisión de una lente en la zona del espectro correspondiente al UV, VS y al IR cercano se recurre a las denominadas *curvas de transmisión*. Dichas curvas, obtenidas a partir de un instrumento denominado *espectrofotómetro*, proporcionan una extensa información sobre las características del filtro de protección solar. A través del análisis de la curva de transmisión se puede saber cuál es el porcentaje de radiación de longitud de onda corta (radiación ultravioleta) que la lente filtra y, en consecuencia, su grado de protección frente a estas radiaciones particularmente nocivas. Ésta es una información que en ocasiones proporcionan los fabricantes, bajo el nombre de *punto de corte al U.V.*, entendiéndose como tal, la λ para la cual la transmisión es de un 1%.

Esta protección es totalmente independiente de la coloración y tonalidad del filtro. Una lente incolora puede presentar total protección al UV.

La primera de las curvas de transmisión de la figura 16.2 (en trazo discontinuo) representa un filtro totalmente incoloro con un punto de corte al UV de aproximadamente 280 nm, mientras que la segunda de las curvas (en trazo continuo) es también incolora, y tiene su punto de corte al UV en 320 nm, por lo que presenta protección frente a esta radiación hasta los 320 nm.

La curva permite conocer, aunque sólo de forma aproximada, la coloración que presenta el filtro observando la zona del espectro visible en la que se da mayor transmisión. Y dentro de un mismo

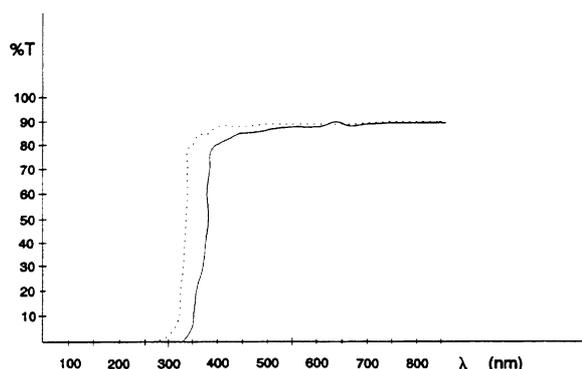


Fig. 16.2

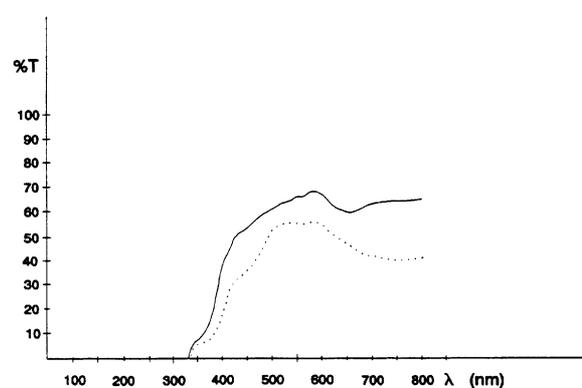


Fig. 16.3

234

Este concepto evita utilizar fracciones decimales cuando nos referimos a transmisiones muy pequeñas. La densidad óptica de un material es un concepto que se suele definir para un determinado espesor; esto permite conocer la densidad del mismo material para cualquier otro espesor.

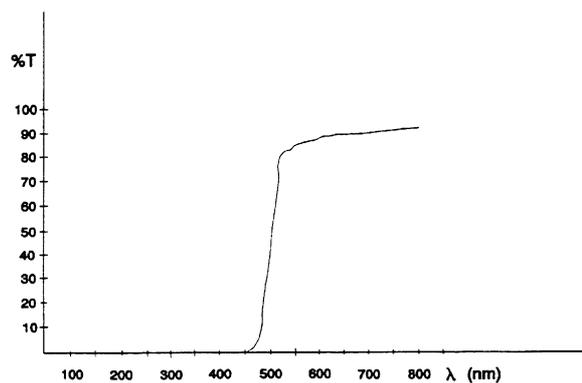


Fig. 16.4

color, una curva de transmisión elevada indica una tonalidad más clara y, en consecuencia, una baja atenuación de la intensidad luminosa que una curva baja, cuya tonalidad será más oscura.

En la figura 16.3 se observan dos curvas de transmisión cuya máxima transmitancia se da aproximadamente en 560 nm, por lo que la coloración de ambas sería verdosa; sin embargo, la curva en trazo continuo presenta una transmisión superior a la de la curva en trazo discontinuo y, en consecuencia, su tonalidad es más clara.

Del mismo modo que la de transmisión, la curva de reflexión informa acerca del porcentaje de luz reflejada por el filtro para cada λ .

Otro método de medida de estas propiedades lo constituyen los *medidores de transmisiones medias* que tan sólo proporcionan una medida media del tanto por ciento de transmisión del filtro en las zonas UV, VS, e IR del espectro.

b) *Densidad óptica*. Se define como el logaritmo de la inversa de la transmisión:

$$D = \log \frac{1}{T} \quad (16.1)$$

c) *Fidelidad cromática*. Si el filtro actúa de modo selectivo absorbiendo en exceso una determinada longitud de onda, provocará una distorsión en la percepción de los colores. En la figura 16.4 se observa la curva de transmisión correspondiente a un filtro amarillo. La absorción total de la zona del espectro visible correspondiente a los azules, hace que este filtro distorsione la visión de los colores que a través del mismo se observan.

El modo de evaluar la fidelidad cromática de un filtro es mediante el denominado *coeficiente de atenuación visual relativo* (Q) calculado para cada uno de los cuatro colores básicos de señal (rojo, amarillo, azul y verde); mediante el cociente entre la *transmisión de señal* (valor tabulado), y la *transmisión luminosa* del filtro solar para el iluminante D65. Si Q es inferior a 0,8 en alguno de los colores, indicaría una excesiva atenuación que daría lugar a la mencionada distorsión cromática.

Propiedades refractivas

Potencia de vértice posterior (Pvp) y *potencia prismática*. Teniendo en cuenta que la lente de protección solar debe ser neutra, se deben marcar unos límites de tolerancia, tanto por lo que respecta a su potencia de vértice posterior (esférica o astigmática) como a su potencia prismática.

Tanto estos límites como el montaje detallado para su medida están especificados en la norma EN.166:1994 que regula las lentes de protección. Ambas medidas pueden ser efectuadas con un frontofocómetro de sensibilidad superior a 0,25 D. Superados los límites de tolerancia, la lente puede ser considerada de calidad dudosa.

Propiedades físicas

Para la determinación de las propiedades físicas, es conveniente medir todos aquellos parámetros que definen la geometría de la lente y, por lo tanto, la homogeneidad de sus superficies. Obtendremos sus potencias esferométricas, sagitas y espesores (central y de borde) midiéndolas respectivamente con un esferómetro, un sagímetro y un espesímetro. El esferómetro y el sagímetro pueden además ser utilizados para determinar la homogeneidad de las superficies de la lente, apoyándolos en el centro de cada superficie y haciéndolos rotar sobre su apoyo central o tomando valores en diversos puntos de la periferia de la lente.

Es también conveniente detectar los defectos físicos superficiales o de masa tales como burbujas, estrías, incrustaciones y demás mediante retroiluminación frente a una pantalla.

Propiedades mecánicas

Las propiedades mecánicas de la lente se determinan mediante la medida de su resistencia al rayado, a la rotura y al impacto. Estas medidas se realizan a base de ensayos especificados en la norma EN.166:1994, que permiten situar a la lente en distintos niveles de resistencia según el grado de superación de la prueba.

16.4 Selección del filtro adecuado

La adecuada selección del filtro solar junto a su correcta utilización determinarán el que la agudeza visual del usuario no se vea mermada.

En el gráfico de la figura 16.5 donde se muestra la relación entre la agudeza visual (% AV) y la luminancia del campo visual (en cd/m^2), se observa cómo una iluminación deficiente reduce la agudeza visual tanto como un exceso de iluminación.

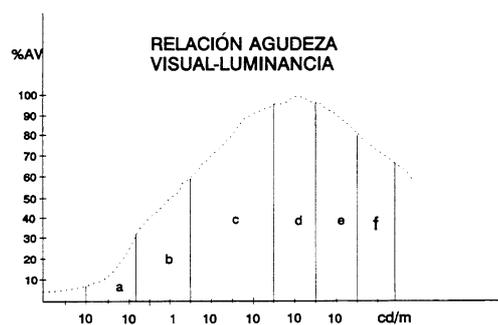


Fig. 16.5

La zona *a* corresponde a la luminancia con luz de luna

La zona *b* corresponde a alumbrado de las calles (público)

La zona *c* corresponde a luz artificial en locales interiores

La zona *d* corresponde a luz diurna al aire libre con el cielo cubierto

La zona *e* corresponde a carretera iluminada por el sol

La zona *f* corresponde a luz en zona de playa o nieve

Al anteponer al ojo un filtro de protección solar, se da una disminución de la iluminación que repercute notablemente sobre la agudeza visual, mejorándola si su utilización es la adecuada o empeorándola en caso contrario. Un filtro de tonalidad oscura que atenúe notablemente la intensidad luminosa, usado en condiciones de baja luminosidad ambiental, empeorará enormemente la A.V. del usuario, del mismo modo que un filtro de tonalidad clara utilizado en un ambiente de fuerte intensidad luminosa no conseguirá mejorar su agudeza visual. Sin embargo, ambos filtros utilizados en las condiciones ambientales adecuadas pueden proporcionar sensación de confortabilidad al tiempo que mejoran la A.V. Como conclusión diremos que la adecuada selección del filtro de protección solar se realizará atendiendo a:

236

- a) su total protección frente a la radiación UV
- b) la atenuación de la intensidad de la radiación visible acorde a la iluminación ambiental en que se vaya a utilizar
- c) la fidelidad cromática
- d) la ausencia de imperfecciones físicas
- e) la resistencia al rayado y al impacto

16.5 Tipos de lentes de protección solar

Lentes minerales coloreadas en masa

Se fabrican añadiendo a la hornada de la masa vítrea ciertos óxidos metálicos antes del proceso de fusión. Éstos conferirán al vidrio diversas coloraciones, y su absorción característica. Así, el óxido de cobalto produce coloraciones azuladas, el óxido de cromo verdes, el óxido de manganeso violetas, y el óxido de uranio amarillas. La combinación de éstos puede dar lugar a multitud de tonalidades distintas.

Lentes minerales coloreadas por depositación en alto vacío

La coloración de las lentes en campana de alto vacío es un proceso industrial que consiste en recubrir las superficies de la lente de una fina película obtenida a partir de la evaporación de óxidos metálicos calentados mediante una resistencia eléctrica, o mediante bombardeo de electrones. Este mismo procedimiento es el empleado para la obtención de las lentes de protección solar con una o ambas superficies espejadas.

Lentes fotocromáticas

Las lentes fotocromáticas poseen la propiedad de oscurecerse al exponerse a la radiación solar y recuperar su estado original en ausencia de ésta. Se trata, por tanto, de lentes de absorción variable representadas por dos curvas de transmisión, una correspondiente a su estado activo oscurecido y la otra cuando la lente se encuentra en su estado claro o de reposo. El proceso químico en que se basa el fotocromatismo se debe a los halogenuros de plata y a un mecanismo de intercambio iónico o, dicho de otro modo, a su capacidad de reacción con la luz. Bajo la acción de la radiación ultravioleta o la radiación de λ corta se produce el siguiente efecto:



donde Ag^+ corresponde al estado claro, y Ag° al estado oscuro.

En ausencia de esta radiación el sistema tiende a su estado inicial:



El mecanismo de oscurecimiento-aclareamiento es reversible y sufre el fenómeno de fatiga.

Las lentes fotocromáticas minerales son masivas. Los halogenuros de plata se encuentran en la propia estructura base de los borosilicatos. La cantidad y medida de los cristales del halogenuro son los que determinan las propiedades fotocromáticas concretas de cada lente y su transmisión viene determinada por los siguientes factores:

- a) la intensidad de la radiación incidente y su longitud de onda
- b) la temperatura de la lente, más oscura cuanto más fría
- c) el espesor de la lente, los microcristales están uniformemente distribuidos en la masa de la lente. Cuanto más gruesa es la lente, mayor número de cristales se activan y en consecuencia se oscurece más que una lente delgada
- d) el número de exposiciones anteriores. Cuanto más trabaja la lente, mayor es su velocidad y su grado de oscurecimiento, y ello supone un problema al tener que reemplazar una de las lentes de una pareja por rotura.

El principio activo de las primeras lentes fotocromáticas orgánicas es completamente distinto al de las minerales. Se consigue depositando una capa uniforme con moléculas fotosensibles que impregne sólo la cara convexa. El compuesto fotocromático consta de una mezcla de tres colorantes y penetra a una profundidad aproximada de 250 micras, y después se somete a un proceso de fijación.

Actualmente se polimeriza conjuntamente el monómero orgánico con las sustancias fotocromáticas. Las lentes fotocromáticas orgánicas son más blancas en estado de reposo que las minerales y la acción de los filtros UV permite un punto de corte al UV mayor que en las anteriores.

Lentes orgánicas teñidas por inmersión

En lentes orgánicas, el sistema de coloreado empleado es el del teñido de las lentes por inmersión de éstas en un tinte. Este es un proceso no industrial que puede llevarse a cabo con una unidad de colo-

reados relativamente simple. Los tintes disueltos en agua se someten a temperaturas de entre 90°C y 95°C, se homogeneiza la disolución y se varía el tiempo de inmersión de la lente en función de la tonalidad que se desea obtener.

Esta técnica de coloreado tiene la ventaja de la homogeneidad del coloreado obtenido, mientras que las lentes coloreadas en masa presentan tonalidades más oscuras en las zonas de la lente de mayor espesor. Permiten obtener una enorme variedad de tonos y colores, así como degradados y bidegradados. El método es simple y su coste es muy bajo.

Lentes polarizantes

Cada rayo de luz está formado por múltiples trenes de onda que vibran con distinta orientación, de modo que presenta una distribución circular simétrica y recibe el nombre de luz no polarizada. Sin embargo cuando la luz sufre reflexión especular sobre superficies dieléctricas como pavimento, arena, agua o nieve es parcial o completamente polarizada en función del ángulo de incidencia (figura 16.6).

238

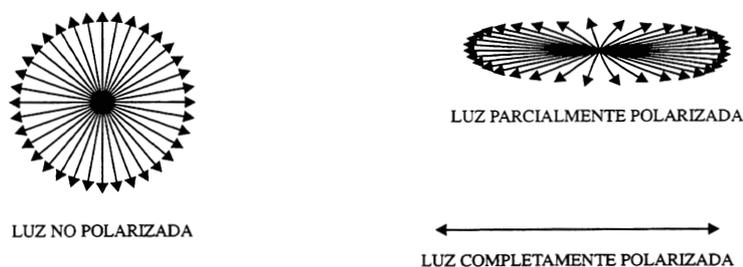


Fig. 16.6

La luz tan sólo se polariza completamente cuando incide con un ángulo específico denominado ángulo de Brewster.

Esto sucede cuando la tangente del ángulo de incidencia es igual al índice de refracción de la superficie sobre la que incide.

$$\operatorname{tg} i = n \quad (16.4)$$

El plano de polarización de la luz reflejada es paralelo a la superficie de reflexión (figura 16.7), y esta luz total o parcialmente polarizada está fuertemente concentrada por lo que puede dar lugar a deslumbramientos o a incomodidad, restando también nitidez en la visión (figura 16.7).

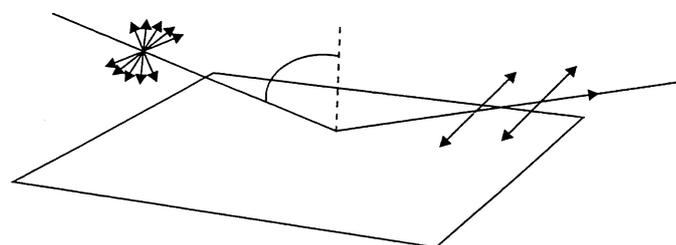


Fig. 16.7

Si se antepone una lente polarizada (analizador) con su plano de polarización en el meridiano vertical, ésta absorberá la luz reflejada polarizada en horizontal. Con esto se consigue reestablecer el balance normal de intensidad luminosa y mejorar ostensiblemente la agudeza visual.

Estos filtros se obtienen calentando y estirando delgadas láminas hasta conseguir alinear su estructura molecular en la dirección del estiramiento y posteriormente se someten a diversos tratamientos químicos. Esta lámina polarizada se introduce entre dos láminas de acetobutirato de celulosa, y se prensa para conferirle la curvatura adecuada.

La transmisión de estas láminas depende del plano de polarización y de la absortancia propia del material, y generalmente se trata de filtros de densidad uniforme desde el centro a la periferia.

Bibliografía

BRITISH STANDARDS Specification for Sun glare eye protectors for general use. 1987.

CORNING FRANCE. Technical Data. 1991.

FANNIN, T. E.; GROSVENOR, T. *Clinical Optics*. Boston, Butterworths, 1987.

GUISASOLA, L.; VAQUERO, L.; SALVADÓ, J. «Lentes de protección solar con tratamiento tipo Vuarnet». *Ver y Oír*. nº 59, Puntex, 1991.

JALIE, M. *The Principles of Ophthalmic Lenses*. Londres, The Association of British Dispensing Opticians, 1988. Normativa Europea EN 165: 1993 y EN 166:1994.

SCHCOLNICOV, B. *Elementos de óptica oftálmica*. Buenos Aires, Novalent, 1979.

ZEISS. *Informaciones para oftalmólogos*. Leipzig RDA, Veb Fachbuchverlag, 1964.

Capítulo 17

Lentes de protección frente a agentes externos

J.A. Martínez

17.1 Normas de seguridad

El peligro de impacto de objetos contundentes a los cuales se ven expuestos los órganos visuales en determinadas actividades laborales ha motivado que determinados países exijan el uso de gafas protectoras para la realización de las mismas con el fin de prevenir las graves lesiones que puedan producirse. En la mayoría de países, la fabricación de lentes de protección está sujeta a una normativa de homologación que determina el grado de resistencia que deben cumplir las gafas expresas para este fin. Generalmente la normativa se refiere al conjunto montura-oculares una vez ensamblados y no a las lentes sueltas.

241

Normativa en España

La normativa vigente en España es la misma que en el resto de los países de la Unión Europea, ya que entró en vigor en julio de 1995 y sustituyó a la anterior norma española MT-16 que databa de 1978. Se trata de la norma EN 166, aplicable a todo tipo de protector ocular como los utilizados en industria, laboratorios, construcción, etc.

A diferencia de la anterior normativa española, se refiere tanto a los protectores con lentes sin prescripción optométrica como a los que sí la tienen. Esta normativa clasifica los protectores según su función, como protección contra: el impacto, las radiaciones ópticas, los metales fundidos, las salpicaduras, el polvo, los gases, y el arco eléctrico; según el tipo: gafas con o sin protectores, caretas protectoras, protectores de soldadura, y cascos protectores; y según el tipo de ocular: oculares minerales no endurecidos, o endurecidos química, térmicamente o por cualquier otro método, oculares orgánicos (plásticos) y oculares laminados.

La normativa, además, marca unas pautas de fabricación y especifica una serie de requerimientos básicos respecto a dimensiones, requerimientos ópticos, calidad del material y superficie, resistencia mecánica, resistencia al envejecimiento, resistencia a la corrosión y resistencia a la ignición, así como las características particulares que debe cumplir un protector según su clasificación.

En lo que hace referencia a los requerimientos de resistencia mecánica, los oculares sin montar deben superar el impacto de una bola de acero de 22 mm de diámetro, y 43 g de masa como mínimo, a una velocidad de 5,1 m/s o, lo que es lo mismo, en caída libre desde una altura de 1,30 m. La prueba no se supera si el ocular se rompe en dos o más partes, o si más de 5 mg de partículas se desprenden.

den en dirección al ojo. Esta misma prueba la deben superar, también, con el sistema completo ya montado, tanto los oculares como los protectores. En el caso particular de protección contra partículas a alta velocidad el ensayo se realiza con una bola de 6 mm de diámetro de 0,86 g de masa y se clasifican en impactos de baja, media y alta energía según si el impacto se efectúa a una velocidad de 45, 120 ó 190 m/s. El sistema de protección mediante gafas tan sólo puede ser clasificado como protector de impactos de baja energía y el ensayo se realiza a las gafas ya montadas. Otro test ensaya la adherencia de metales fundidos o la resistencia a la penetración de sólidos a altas temperaturas. Las condiciones en las cuales se han de realizar todas estas pruebas son perfectamente reproducibles y están especificadas en la norma EN 168.

Otras normativas

La mayoría de normativas existentes, al igual que la anterior norma española, se refieren a gafas de protección neutras, y no tienen en cuenta la posible prescripción optométrica que el usuario pueda precisar. Las pruebas que se exigen son similares, con pequeñas variaciones sobre todo en la clasificación de los diferentes sistemas de protección más que en el tipo de ensayo. Pero lo que sí es común en la mayoría de normativas es que son de obligado cumplimiento tan sólo para los elementos de protección que con tal fin son utilizados, y no suele existir una normativa que exija una mínima resistencia mecánica de los oculares o gafas de uso común, a pesar que en caso de accidente pueden ocasionar lesiones muy graves para la integridad ocular. Un caso especial es el de EEUU, donde además de existir la normativa referente a la protección industrial, existe otro tipo de regulación de la FDA (Food and Drug Administration) de cumplimiento para todo tipo de lente oftálmica, es decir, también para las de uso general, la cual exige que toda lente de uso oftálmico debe superar la prueba contra el impacto, que básicamente consiste en el mismo ensayo de caída libre de una bola de acero de la normativa europea: el peso de la bola es de 16 g y la altura de 127 cm.

Con la creación de la nueva normativa europea se pretende unificar los criterios de todos los países de la Comunidad Europea sustituyendo o complementando las diferentes normativas de cada uno de los estados miembros. Pero tan sólo se regulan los sistemas de protección integrales, y se dejan en manos del óptico la recomendación del uso de la lente más idónea en colectivos expuestos a peligro en caso de rotura como pueden ser los niños y los practicantes de determinadas actividades deportivas, que lo que necesitan es seguridad y no protección.

17.2 Endurecido térmico y químico de lentes minerales

El vidrio es un material frágil que soporta grandes fuerzas de compresión pero no de tracción, a las cuales es muy vulnerable; de ahí que ésta sea absolutamente siempre la causa de su rotura. Resiste muy bien fuerzas de compresión de hasta 100 Kg/mm²; sin embargo, se rompe con fuerzas de tracción de tan sólo 4 Kg/mm². La resistencia mecánica que presenta un determinado vidrio no depende únicamente de su composición, sino que también interviene el estado de su superficie. Esto explica la gran diferencia existente entre la resistencia teórica prevista para un determinado objeto de cierto material, y el resultado experimental obtenido.

Es decir, que la presencia de microfisuras en la superficie del vidrio, aun estando cuidadosamente pulido, hará que éste sea más vulnerable a la rotura; una imagen cotidiana que nos muestra este fenómeno es la que se produce cuando para tallar un vidrio se raya previamente su superficie con diamante para facilitar la rotura por esa zona en concreto. De manera que, el desgaste del vidrio con el

tiempo no mejora su resistencia, sino todo lo contrario, ya que las microfisuras tienden a desarrollarse y a éstas se añade el rayado accidental por su uso.

Se describen los siguientes mecanismos por los cuales una lente puede romperse tras un impacto:

a) Rotura originada en la superficie frontal debido a simple deformación elástica (figura 17.1): ésta se da en impactos de objetos pequeños a alta velocidad.

b) Rotura con origen en superficie posterior por flexión de la lente (figura 17.2): ésta se da por colisión de un objeto de masa moderada, a velocidad moderada, sobretodo en lentes negativas cuyo espesor de centro es menor que el de los bordes; la rotura ocurre cuando la tensión en la superficie de la segunda cara excede de la resistencia de la misma.

c) Rotura producida por simple flexión o aplanamiento (figura 17.3): se da sobre todo en lentes positivas y la producen los objetos de gran tamaño a baja velocidad.

d) Rotura producida por reflexión de la onda elástica que produce el golpe (figura 17.4): se da cuando una lente es golpeada frontalmente por un objeto, que es rebotado elásticamente y en ese punto la superficie no presenta fisuras suficientes para producir una rotura. El golpe entonces se propaga en forma de onda, y si en otro punto encuentra una fisura suficientemente importante se producirá la rotura por ese punto.

Dada esta vulnerabilidad del vidrio a cualquier tipo de impacto y dada la necesidad de seguridad que evidentemente se le ha de exigir a un vidrio oftálmico destinado al cuidado y la protección de los ojos, surge la necesidad de aumentar su eficacia frente a este tipo de accidentes, aumentando su resistencia mecánica. Existen dos métodos para conseguir aumentar la resistencia al impacto de las lentes mediante la compresión de su superficie, y son los que a continuación se pasan a detallar.

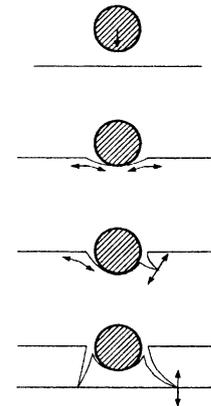


Fig. 17.1

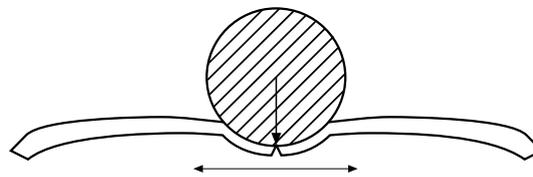


Fig. 17.2

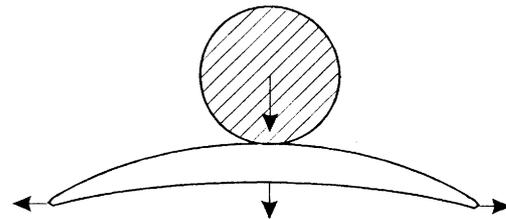


Fig. 17.3

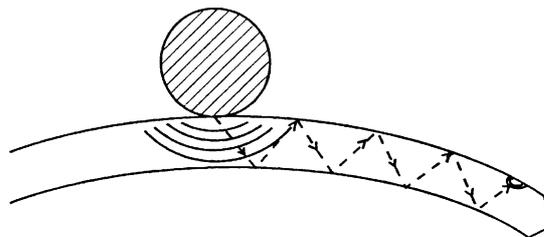


Fig. 17.4

Templado térmico

El proceso de templado térmico tiene más de 120 años, y una de las primeras patentes fue la de François de la Bastie en 1874, que consistía en calentar objetos de vidrio a alta temperatura y sumergirlos rápidamente en grasa o aceite a temperatura ambiente. Pero es a comienzos del siglo XX cuan-

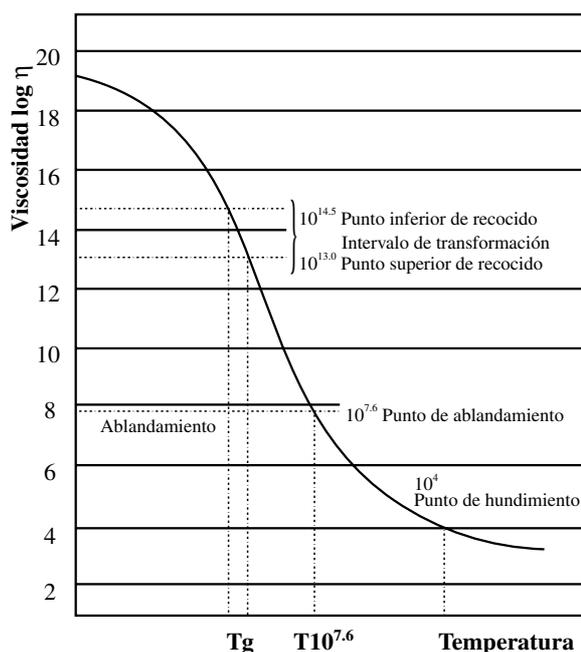


Fig. 17.5 Variación de la viscosidad en función de la temperatura y el punto de ablandamiento $\eta = 10^{7.6}$ dPa.s

244

crea fuertes tensiones de compresión en la superficie, contrarrestadas por las tensiones de tracción internas. La compresión no es uniforme por toda la superficie, ya que depende de la cantidad de aire que llega a cada punto de la lente.

Es preciso un cuidado del tiempo de calentado para que la compresión produzca la mínima distorsión en la superficie de la lente. Un sobrecalentamiento puede producir deformaciones en la superficie, y calentarla por defecto nos puede llevar a una insuficiente compresión y, por lo tanto, a un endurecido deficiente. La compresión de la superficie provoca tensiones internas, fácilmente identificables por el fenómeno de birrefringencia; por eso, si colocamos una lente templada entre dos laminas polarizantes orientadas perpendicularmente (polariscopio), se observa fácilmente la imagen de birrefringencia. Usualmente la imagen que se observa es la de una cruz de Malta (figura 17.6); sin embargo, son posibles un sinnúmero de formas. Algunos estudios apuntan a que las lentes no se pueden clasificar por su resistencia según la imagen de birrefringencia que se observa, ya que una imagen nos indica que la lente ha sido templada pero no si el proceso ha sido o no satisfactorio.

El aparato que se utiliza consiste básicamente en un horno capaz de mantener la temperatura constante con variaciones relativamente pequeñas de tan sólo algunos grados, un temporizador que controla el tiempo que la lente permanece en el interior del horno y un par de bufadores con los cuales se enfría la lente por ambas superficies.

La temperatura en el interior del horno depende del tipo de vidrio que se esté templando ya que, como puede verse en la figura 17.7, la temperatura correspondiente a una cierta viscosidad varía según el tipo de vidrio, de forma que si en una mufla calibrada para un vidrio *crow*n templamos un vidrio de índice 1,6 la lente se deforma en el proceso, y sin embargo, si se trata de un vidrio *flint* de índice 1,7 lo que ocurre es que la lente no queda templada ya que no se llega a la temperatura suficiente que proporcione la viscosidad necesaria.

do se desarrolla la técnica de enfriamiento con aire a presión, y a partir de 1920 se incorpora en el proceso industrial.

El proceso consiste en calentar las lentes a una temperatura cercana al punto de ablandamiento (viscosidad = $10^{7.6}$ dPa.s) (figura 17.5), es decir, para un vidrio *crow*n entre 600°C y 650°C; y rápidamente enfriarla con un chorro de aire colocado enfrente de cada una de las superficies.

El calentamiento produce la dilatación del vidrio, pero al enfriarse bruscamente, por acción del aire, la superficie de la lente se vuelve rígida enseguida y se contrae ligeramente, mientras que el interior de la misma, debido a la mala conductividad térmica del vidrio, se mantiene fluida por la alta temperatura. A medida que la masa se va enfriando las partes internas tienden a contraerse, lo cual es imposibilitado por las zonas más externas que ya están rígidas. Esto

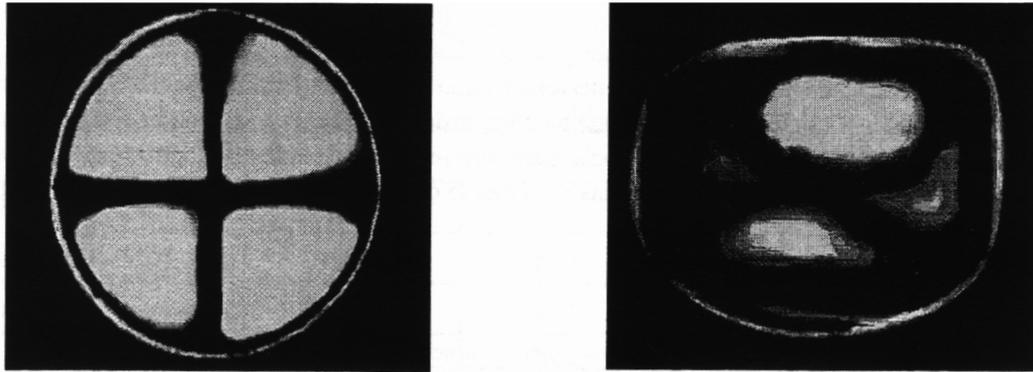


Fig. 17.6 Simulación de la imagen de la lente a través de un polariscopio. A la derecha, imagen habitual en forma de cruz de malta; a la izquierda, imagen de una lente perfectamente endurecida

De aquí la importancia de tener en cuenta la temperatura a la cual trabaja el aparato que se utiliza, ya que existen muflas en las que la temperatura no es un parámetro que se pueda modificar y, por lo tanto se deberá tener en cuenta las limitaciones que presenta el tipo de vidrio que se puede tratar. El tiempo que la lente debe permanecer en el interior del horno depende de su espesor (directamente relacionado con su potencia); así, cuanto mayor sea el espesor mayor tiempo será necesario para que las zonas internas de la lente alcancen la temperatura o viscosidad necesarias. Si el tiempo es excesivo se correrá el riesgo de deformar la lente debido al efecto de la gravedad en un material fácilmente deformable a esta temperatura.

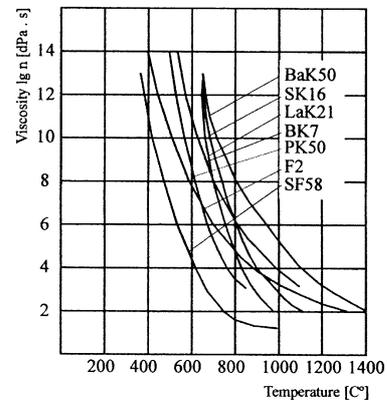


Fig. 17.7 Relación viscosidad-temperatura para diferentes materiales

Templado químico

El proceso de templado químico, así llamado por su similitud con el templado térmico, se desarrolló en varios laboratorios a la vez hacia finales de la década de los 50, y consiste básicamente en intercambiar un ion alcalino del vidrio por otro ion alcalino cuyo radio iónico sea mayor (por ejemplo, Li^+ o Na^+ por Na^+ o K^+). Esto crea un estado de compresión en la superficie, similar a lo que ocurre con el templado térmico. El proceso necesario para que se dé este intercambio consiste en poner en contacto el vidrio que se quiere tratar con una sal fundida que contenga el ion de radio mayor (figura 17.8).

La temperatura, aproximadamente $450^{\circ}C$, es un factor importante de este proceso, pues no ha de ser inferior a la temperatura de fusión de la sal utilizada, obviamente, pero tampoco ha de ser supe-

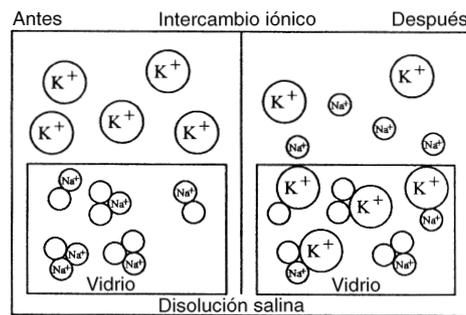


Fig. 17.8 Intercambio iónico

rior a la temperatura de ablandamiento del vidrio, ya que esto causaría una relajación de las tensiones creadas y se anularía el efecto buscado. Otro factor importante es el tiempo, puesto que el mecanismo de funcionamiento es por difusión, de manera que a mayor tiempo mayor penetración; pero del mismo modo, si el tiempo es excesivo aumenta el grado de relajación de las tensiones, y se consigue un templado menos efectivo. El tiempo requerido para un tratamiento de este tipo es de unas 16 a 24 horas, aunque existen técnicas que lo reducen considerablemente utilizando ultrasonidos para facilitar el intercambio iónico. La composición del baño es nitrato de potasio, nitrato de sodio, y ácido silícico, y las proporciones dependen del tipo de vidrio que se pretende templar. Para realizar el templado químico las superficies del vidrio han de estar perfectamente limpias y homogéneas, y suele ser necesario un pre-calentado de unos 30 minutos antes de iniciar el proceso, excepto para los vidrios fotocromáticos que podrían ver alteradas sus propiedades. Como se puede observar en la tabla 17.1, el conocimiento de la composición química del vidrio que se quiere tratar es imprescindible, ya que condiciona directamente los parámetros anteriormente mencionados hasta tal punto que un vidrio tratado con un baño diseñado para un tipo de vidrio diferente no presenta diferencia alguna respecto a la resistencia mecánica con un vidrio no tratado, puesto que no se puede dar el intercambio iónico.

Tabla 17.1 Parámetros para el templado térmico de diferentes materiales.
Datos extraídos del catalogo de vidrio óptico de Corning[®]

	V.blanco n=1.523 (LJUV,TRC3...)	Color masivo n=1.523 (ROSE TRC...)	V.alto índice n=1.6 (1.6/41 TC)	Fotocromático n=1.523 (PHOTOBROWN)
Nitrato de potasio	99.3 %	99.3 %	59.5 %	59.5 %
Nitrato de sodio	0.2 %	0.2 %	40 %	40 %
Acido silícico	0.5 %	0.5 %	0.5 %	0.5 %
Temperatura	450 °C	440 °C	400 °C	400 °C
Tiempo	16 h.	16 h.	16 h.	16 h.
Pre calentado	30 min.	30 min.	30 min.	30 min.

246

Resistencia al impacto

Ambos procesos persiguen un mismo fin: aumentar la resistencia mecánica del vidrio o, lo que es lo mismo, que consiga soportar mejor el impacto de un cuerpo sin romperse. Para ello, en ambos casos se trata de que las zonas más externas de la lente se encuentren en un estado de compresión respecto a las zonas más internas; esto hará que cuando una fuerza de extensión, responsable de la rotura del vidrio, actúe sobre la superficie del mismo, sea contrarrestada por las fuerzas de compresión existentes.

Como se puede observar en la figura 17.9, en la que se da un valor positivo a la fuerza de extensión, negativo a la fuerza de compresión y donde W es la fuerza de impacto, la columna (a) representa un vidrio sin templar. Éste se rompe cuando es sometido a un impacto W , puesto que provoca la fuerza de extensión necesaria para ello. En la columna (b) tenemos el mismo vidrio templado sometido a la misma fuerza de impacto W ; sin embargo, ésta no es suficiente para provocar la fuerza de extensión necesaria para romperlo, en este caso 10.000. En la columna (c) se muestra cómo la intensidad del impacto ha de ser bastante superior (1.5 veces) para provocar la misma fuerza de extensión que en el primer caso (10.000) y que haga que la lente se rompa, puesto que es compensada por la fuerza de compresión existente en la lente endurecida.

Así, tenemos que la efectividad del proceso está relacionada con el grado de compresión que presentan las zonas superficiales del vidrio con respecto a las zonas internas y esto es sensiblemente

diferente según el tipo de templado que se haya realizado, ya que el templado químico, por sus características, consigue fuerzas más homogéneas que provocan que la diferencia de fuerzas entre las capas internas y externas sea mayor, mientras que en el caso del templado térmico esta diferencia de fuerzas es más gradual (figura 17.10). A este factor se le suma el de contribuir a la mejora de las microfisuras que puede presentar el vidrio.

Sin embargo, pese a su mayor efectividad, la práctica del templado térmico está muchísimo más extendido que el templado químico, y esto es así por varias razones:

- a) *Tiempo*: el tiempo necesario para cada proceso difiere de una manera importante, pues mientras el templado térmico suele durar unos pocos minutos, el caso del templado químico dura unas pocas horas en el mejor de los casos.
- b) *Economía*: por las características de instrumental y mantenimiento existe una gran diferencia en el coste económico, pues es significativamente mayor el proceso de templado químico.
- c) *Facilidad*: mientras que el templado térmico se puede realizar a la práctica totalidad de tipos de vidrio con tan sólo variar unos cuantos parámetros fácilmente modificables, el templado químico no se puede aplicar a todo tipo de vidrio por no ser posible el intercambio iónico, como por ejemplo ocurre con los vidrios de alto índice. Además es un tratamiento muy específico, ya que según el tipo de material la composición del baño ha de ser diferente.
- d) *Comprobación del proceso*: un vidrio templado térmicamente es fácilmente identificable, como ya se ha comentado anteriormente, mediante la visión a través de un polariscopio de la cruz de Malta. Por contra, un vidrio templado químicamente no se puede identificar fácilmente. Es importante tener en cuenta que el proceso de templado ha de ser siempre posterior al biselado de la lente, ya que si no se corre el peligro de que se rompa violentamente y de forma inesperada, puesto que está sometida a grandes tensiones.

Es posible trabajar el bisel de una lente ya templada, pero para ello es necesario suprimir las tensiones o, lo que es lo mismo, deshacer el proceso de endurecido. Consiste en seguir el mismo proceso de templado, pero cuando la lente está en el interior del horno a la temperatura requerida se debe desconectar el mismo y dejarla enfriar suavemente, sin enfriamiento brusco. Esto hará desaparecer las tensiones, pero al mismo tiempo hará que la lente no esté endurecida.

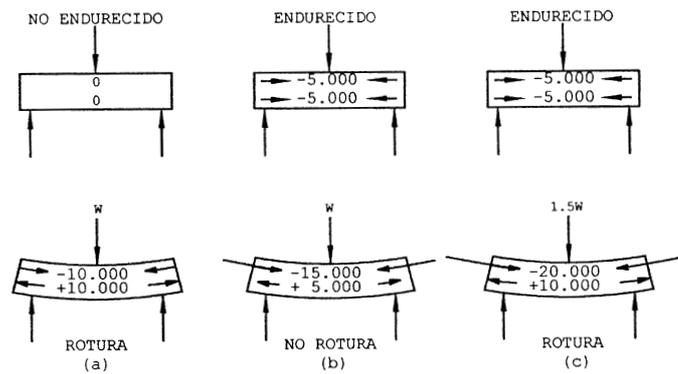


Fig. 17.9

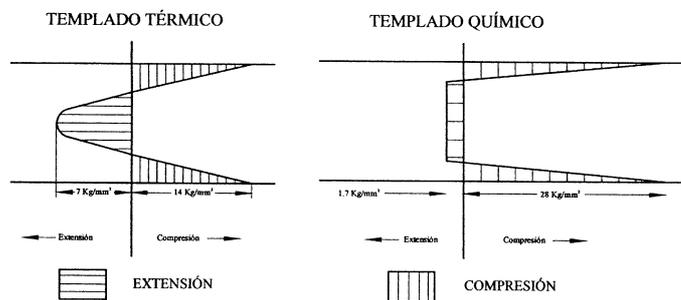


Fig. 17.10 Fuerzas de extensión y compresión. A la derecha templado térmico; a la izquierda templado químico

17.3 Tratamientos superficiales en lentes orgánicas

El uso de lentes orgánicas o de material plástico como lentes de protección contra el impacto viene justificado por su gran resistencia mecánica, ya que superan las pruebas de impacto de las diferentes normativas de protección industrial, y presentan una mayor resistencia mecánica que cualquier lente mineral, esté o no endurecida. Los materiales más utilizados son:

a) *Resina de Columbia* o *CR39*: se trata de carbonato de polialilidiglicol, material ligero cuya densidad es de $1,32 \text{ g/cm}^3$ y su índice de refracción de 1,498. Posee una buena calidad óptica tanto por su transparencia como su dispersión cromática, y un número de Abbe de 58. Es el material orgánico por excelencia en óptica oftálmica.

b) *Policarbonato*: es un material sintético termoplástico muy ligero, con una densidad aún menor que el CR39 de $1,2 \text{ g/cm}^3$ y un índice de refracción de 1,586, pero su propiedad más importante es su resistencia a los golpes; sin embargo, tiene una gran dispersión cromática, con un número de Abbe de 30. Además es un material extremadamente blando, es decir, se raya con gran facilidad. Es muy utilizado en gafas y sistemas de protección neutros.

c) *Otros materiales*: el metacrilato es un material de considerable resistencia, pero sus cualidades ópticas lo han ido relegando prácticamente al uso en la producción de oculares integrados en la propia montura. Otro tipo de lentes utilizados para los sistemas de protección ocular son las lentes laminadas, como la desarrollada por Corning, que consiste en una lente mineral, a la cual se le adhiere en la segunda cara una lamina de poliuretano de unos 0,4 mm. Con ello se consigue que aumente considerablemente su resistencia mecánica así como la seguridad, ya que en caso de rotura las partículas desprendidas no incidirán sobre el ojo. Estas lentes serán más gruesas que una lente normal realizada en mineral *crow*n. Otro material cuyo uso es cada vez más usual son las lentes orgánicas de índice 1.6, de características similares al CR39 pero con la ventaja de ser más delgadas. El inconveniente de esta lente es su vulnerabilidad frente al rayado.

248

La gran ventaja y característica común de todo tipo de lente de material plástico es su resistencia en caso de impacto. Por ello, en caso de actividades susceptibles de sufrir golpes, los ojos estarán mucho más protegidos, no tan sólo por soportar sin romperse impactos de mayor envergadura, sino porque además, en caso de rotura, los fragmentos de lente desprendidos no serán tan incisivos por no presentar astillas, y se evitarán posibles daños y lesiones oculares que puedan producirse. Otra característica de las lentes orgánicas es que las pequeñas partículas a alta velocidad o temperatura elevada, como las que se producen en el corte con disco de diferentes materiales de construcción, etc., no se quedan adheridas, sino que rebotan, a diferencia de lo que sucede en las lentes minerales.

Pero el gran inconveniente de este tipo de lentes es su facilidad de rayado. Sobre todo cuando su uso se realiza en ambientes no exentos de polvo o suciedad, lo que implica una mayor necesidad de limpieza en condiciones desfavorables. De aquí la necesidad de proteger este tipo de superficie con tratamientos que le confieran una mayor resistencia contra el rayado.

La capa superficial de este tratamiento debe tener una serie de características:

- a) Resistencia al rayado similar a la del vidrio mineral.
- b) Ha de ser perfectamente transparente y no interferir en la coloración.
- c) La resistencia al rayado no debe deteriorarse con el tiempo.
- d) Debe tener una buena adherencia sobre la base orgánica y no desprenderse con el tallado ni con el uso diario.
- e) No ha de alterar el poder dióptrico de la lente.

- f) No ha de alterar las características de transmisión de la lente.
- g) Debe tener cierto grado de flexibilidad para no romperse o resquebrajarse al insertar la lente durante el montaje en la montura o con el uso diario.
- h) Debe ser inerte frente a productos químicos como el sudor o los cosméticos.
- i) Debe soportar la exposición a temperaturas relativamente altas como las que se producen en un objeto expuesto al sol, así como soportar bien los cambios bruscos de temperatura.

Las primeras capas que se utilizaron fueron depósitos de cuarzo depositados en la superficie de las lentes mediante la evaporación del material, en una campana de vacío. La ventaja del cuarzo es que es un material inorgánico de alta dureza y de unas excelentes propiedades ópticas.

Además, el proceso de metalización se realiza a temperaturas relativamente bajas, perfectamente compatibles con el material orgánico. Pero el problema que plantea es el de la adherencia, debido al diferente coeficiente de dilatación, pues la dilatación térmica del cuarzo es unas 200 veces menor que la del CR39, y a la poca flexibilidad, lo cual provoca que la capa superficial no pueda adaptarse a las variaciones de forma de la lente orgánica, mucho más flexible. Así, si en algún momento se ejerce una fuerte presión sobre la superficie, se puede provocar una ruptura local de la capa y la fragmentación de la misma. El comportamiento rígido y frágil del cuarzo (SiO_2) es debido a la unión de sus componentes, los átomos de silicio y de oxígeno, ya que las moléculas se entrelazan entre sí de una forma compacta en una estructura cuadrículada formada por tetraedros. Para conseguir un material similar, pero más elástico, es necesario formar una estructura en la que parte de los átomos no estén fijados en esta rígida estructura tridimensional. Esto es químicamente posible gracias a la elaboración de los organoalcoxisilanos, que son uniones del silicio con el oxígeno, y de ciertas moléculas orgánicas, ya sean restos de hidrocarburos o grupos etílicos. No obstante, las moléculas de alcoxilano no pueden por sí solas formar una capa capaz de ofrecer una buena resistencia. Para ello, mediante hidrólisis, se transforma en silanol y, por polimerización con temperatura y tras añadir un catalizador, se forma una unión de macromoléculas de polisiloxano. En función de la molécula orgánica que se utilice, se le confiere a la capa mayor elasticidad, o mayor dureza y fragilidad, habiéndose de buscar una relación óptima entre las dos características. Debido a la mayor afinidad química con el substrato plástico, la fijación de esta capa no es tan sólo física, sino también química, a diferencia del cuarzo, por lo que la dilatación térmica será parecida.

La deposición de este tipo de capa no es posible realizarlo mediante metalización al vacío, pues se descompondría químicamente. Pero su consistencia, similar al barniz, permite depositarla sobre las superficies de la lente por el procedimiento del temple.

Para ello las lentes han de ser previamente preparadas mediante un lavado intensivo, que consiste en baños químicos de desengrasado y de ultrasonidos. Después son secadas y deshidratadas con ayuda de alcoholes, para posteriormente depositar la capa bañándolas al temple. En este punto es muy importante controlar meticulosamente la viscosidad y la velocidad con la que se sacan las lentes del baño, pues podría dar lugar a diferencias de espesor. Posteriormente se lleva a cabo la polimerización a una temperatura cercana a los 100°C . Evidentemente estos procesos se realizan de forma automática y con la máxima limpieza y

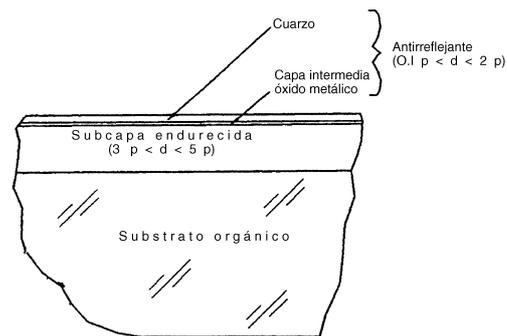


Fig. 17.11 Tratamiento antirreflejante y endurecido sobre una lente orgánica

meticulosidad, ya que de ello dependerá la calidad del tratamiento, así como su adherencia. Las capas de siloxano tienen un grosor entre 3 y 5 μm , según la composición exacta del producto utilizado y el procedimiento de endurecido.

Existen otros sistemas de deposición, como puede ser la centrifugación y posterior polimerización, que permite una mayor homogeneidad del grosor de la capa en superficies no uniformes como los bifocales; o la inclusión del compuesto en la propia composición durante el moldeado de la lente. Los tratamientos de endurecido se hacen todavía más necesarios en los materiales orgánicos de alto índice, más blandos y vulnerables. En combinación con el tratamiento de endurecido, y para aumentar la duración de las lentes, también se suelen tratar las superficies con una capa superficial hidrófuga, cosa que permite una limpieza más fácil, y capas antirreflejantes de las mismas características que las utilizadas en las lentes minerales, pero con la única diferencia de tener en cuenta que el material orgánico no es posible exponerlo a temperaturas elevadas.

De cualquier modo, lo que un proceso de endurecido siempre ha de perseguir es su calidad y efectividad, es decir, que el usuario de esa lente tenga los menores problemas de rayado posibles con el uso diario. Para ello es necesaria una metodología para cuantificar la calidad y la efectividad del tratamiento, no tan sólo para asegurar su reproducibilidad en los controles de calidad de los procesos de producción industrial, sino también para mejorar y desarrollar nuevos tratamientos y materiales. Sin embargo, no existe uniformidad en los ensayos que se realizan para valorar los tratamientos, sino que cada fabricante realiza los ensayos que cree más oportunos.

Cualquier ensayo ha de cuantificar la eficacia del tratamiento. Por eso, evidentemente, el ensayo más efectivo para medir la calidad de un tratamiento de este tipo es el uso cotidiano de las lentes por un grupo de usuarios reales, durante un período de tiempo significativo. Esto, además de costoso, es poco efectivo, tanto por el tiempo necesario, como por la reproducibilidad. El análisis de la efectividad y calidad del tratamiento debe cumplir con una serie de requisitos, como son:

250

- a) Obtener unos resultados lo más similares posibles al uso real de las lentes.
- b) Tener en cuenta los diferentes tipos de abrasión a los que se pueden ver sometidas las lentes durante su uso pues, por ejemplo, no es el mismo tipo de rayado el que se produce a una lente por el efecto de rozamiento durante una limpieza más o menos desafortunada, que el producido por un impacto o incisión accidental.
- c) Ser lo suficientemente discriminatorio para diferenciar materiales de muy similares características.
- d) Poderse experimentar sobre diferentes tipos de materiales.
- e) Ser lo más fácil y rápido posible.
- f) Ser perfectamente reproducible.

Para analizar toda esta serie de factores se suele utilizar un grupo de tests, como puede ser la prueba de abrasión mediante goma, mediante lana de acero, o con el diamante, para valorar la resistencia a la abrasión; el test de choque térmico, o el de envejecimiento artificial para valorar la adhesión de la capa tras soportar cambios de temperatura y exposición a condiciones climatológicas extremas, respectivamente. Pero la falta de uniformidad en el uso de estos ensayos hace que no sea una herramienta todo lo eficaz que debiera para una valoración y cuantificación de los tratamientos de endurecido de una forma objetiva, aunque sí un método de control interno del fabricante.

Bibliografía

- BRANDT, N.M. «The Anatomy and Autopsy of an Impact Resistant Lens.» *Am J Optom Physiol Opt*, nº 51, 1974.
- DUCKWORTH, W.H. «Strength of Glass Lenses Processed in an Ultrasonic Stimulated Chemtempering Bath.» *Am J Optom Physiol Opt*. nº 61, 1984.
- EUROPEAN COMITTEE FOR STANDARDIZATION. «Personal eye-protection specifications, EN166». Bruselas, 1994.
- EUROPEAN COMITTEE FOR STANDARDIZATION. «Protection individuelle de l'oeil-Méthodes d'essais autre qu'optiques, EN 168». Bruselas, 1994.
- FANNIN, T.E.; GROSVENOR, T. *Clinical Optics*. Boston, Butterworths, 1987.
- HORNE, D.F. *Spectacle Lens Technology*. Bristol, Adam Hilder Ltd., 1978.
- JENA GLASSWERK SCHOTT & GEN. *Optical Glass Catalogue*. Mainz, 1980.
- MARI, E.A. *Los vidrios*. Buenos Aires, Américalee, 1982.
- OBSTFELD, C.M. «Abrasion resistance tests for plastic lenses». *Optical World*, vol. 20, nº 41, 1991.
- OLIVER, A.L. «A Ballistic Evaluation of the Impact Resistance of Spectacle Lens Materials». *Optometry and Vision Science*, vol. 70, 1993.
- WIGGLESWORTH, E.C. «The Birefringence fallacy». *Am J Optom Physiol Opt*, vol. 52, 1975.

Capítulo 18

Tratamientos antirreflejantes

L. Guisasola

18.1 Reflejos parásitos en lentes oftálmicas

Cuando un haz de luz atraviesa una superficie que separa dos medios transparentes de distinto índice de refracción, la mayor parte de su intensidad es refractada, pero una pequeña parte es absorbida por el medio y otra se refleja. En el caso concreto de las lentes oftálmicas donde los dos medios son aire y vidrio, la luz reflejada puede provocar problemas al usuario, tales como la percepción de falsas imágenes, el deslumbramiento o simplemente la sensación de incomodidad y pérdida de contraste.

Para luz con incidencia normal, la intensidad de luz reflejada o reflectancia viene dada por la ecuación de Fresnel:

$$R = \frac{(n' - n)^2}{(n' + n)^2} \quad (18.1)$$

De ella se desprende que la reflexión está en función de los índices de refracción de ambos medios. En lentes oftálmicas, cuanto mayor es el índice de refracción del material, mayor es la intensidad de luz reflejada; así, una lente de vidrio *crown*, cuyo $n=1.523$, tiene un coeficiente de reflexión del 4.3%, mientras que una lente de material *flint* $n=1.701$ tiene una reflexión mayor, del 6.7%.

Teniendo en cuenta que una lente oftálmica está constituida por dos dioptrios, se producirá reflexión en cada uno de ellos, lo que puede ser origen de imágenes parásitas.

Se pueden distinguir cuatro tipos distintos de reflejos:

a) Reflejos sobre la superficie cóncava de la lente (figura 18.1), producidos por luz procedente de la parte posterior de la lente (detrás del usuario) y que penetran oblicuamente por la pupila del ojo después de reflejarse en la segunda superficie de la lente. Este tipo de reflejos suelen ser de los más perjudiciales ya que son de gran intensidad. Es posible paliarlos ligeramente, reduciendo el tamaño de la lente correctora.

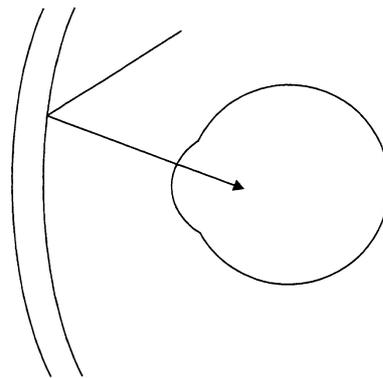


Fig. 18.1 Reflejos sobre la superficie cóncava de la lente

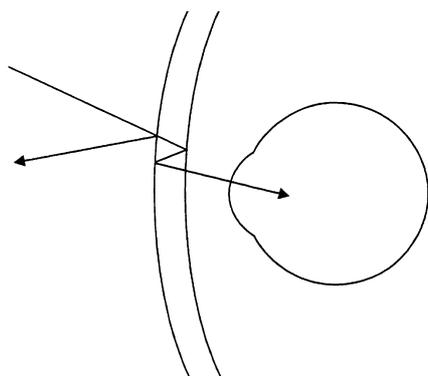


Fig. 18.2 Reflejos sobre la superficie convexa de la lente

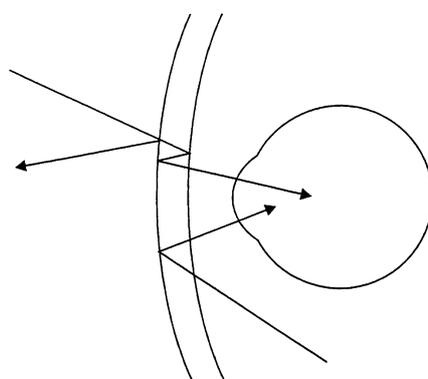


Fig. 18.3 Reflejos internos

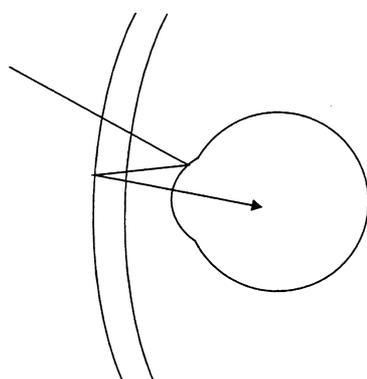


Fig. 18.4 Reflejos corneales

b) Reflejos sobre la superficie convexa de la lente (figura 18.2), producidos por luz que proceda de la zona anterior (delante de la lente): el único perjuicio que provocan es el tipo estético ya que ocultan los ojos del usuario.

c) Reflejos internos (figura 18.3). Tanto si son producidos por luz procedente de la zona anterior o posterior de la lente, se deben a una doble reflexión interna, por lo que su intensidad y, en consecuencia su efecto perjudicial es inferior a los casos anteriores. Sin embargo, puede dar lugar a una doble imagen que en casos concretos como el de la conducción suponen un grave inconveniente.

d) Reflejos corneales (figura 18.4). Son producidos por luz que se refleja en primer lugar en la córnea, después en alguna de las superficies de la lente, y después se introducen en el ojo. Su intensidad es muy débil y sólo revisten alguna importancia cuando la potencia de la lente correctora es muy elevada.

A fin de controlar las reflexiones indeseadas existen métodos, tales como cambiar la curvatura de las lentes, modificar el ángulo pantoscópico, reducir la distancia de vértice, o reducir el diámetro de las lentes. Si bien algunos de estos métodos pueden paliar ligeramente el problema, ninguno de ellos constituye una buena solución.

Los tratamientos antirreflejantes, aunque no eliminan el 100% de la luz reflejada, la pueden reducir hasta límites prácticamente despreciables y aumentan la transmisión por lo que constituyen sin lugar a dudas la mejor de las soluciones.

18.2 Tratamientos antirreflejantes en lentes minerales

La eliminación de los reflejos se basa en el principio de interferencias según el cual dos ondas de igual amplitud y longitud de onda se anulan cuando entre ellas existe un desfase de $\lambda/2$ (oposición de fase). Cuando se aplica una pequeña capa transparente sobre la lente oftálmica, se dan dos reflexiones, una entre el aire y la capa, y otra en la interfase entre la capa y el vidrio.

El índice de refracción y el espesor de la fina capa depositada deben ser calculados para obtener una reflexión resultante nula a partir de las dos reflexiones de las superficies limitantes de la capa. De este modo, la luz que no se refleja será refractada. A fin de satisfacer la condición de que las dos ondas reflejadas sean de igual amplitud se debe cumplir:

$$R_1 = \left(\frac{n-1}{n+1}\right)^2 = R_2 = \left(\frac{N-n}{N+n}\right)^2 \tag{18.2}$$

De esta igualdad se obtiene:

$$n = \sqrt{N} \tag{18.3}$$

El índice de refracción de la capa depositada (n) debe ser igual a la raíz cuadrada del índice de la lente oftálmica (N).

Pero el material de la capa depositada, además de tener el índice de refracción calculado, debe tener unas propiedades tales como la buena adherencia a la lente, unas mínimas condiciones de dureza y debe ser resistente a los agentes químicos. El fluoruro de magnesio es uno de los materiales más utilizados en depositación de capas antirreflejantes sobre lentes minerales dado que reúne una buena combinación de las propiedades antes mencionadas y su índice (n = 1,38) se acerca mucho al índice idóneo para lentes *crowns*, ya que la raíz cuadrada de este índice n = 1,523 es justamente n = 1,234. Otros de los óxidos metálicos frecuentemente utilizados son el fluoruro de lantano y el óxido de aluminio.

El espesor de la capa debe ser calculado de modo que satisfaga la condición de diferencia de fase, esto es, para que la fase sea igual a λ/2 el espesor de la capa debe ser e = λ/4 n.

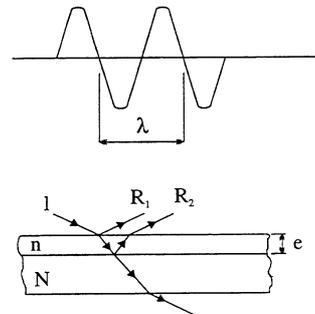
Teniendo en cuenta que el ojo es sensible al amplio rango de longitudes de onda del espectro visible, se suele calcular el espesor de la capa utilizando la longitud de onda 555 nm, para la que el ojo tiene su máxima sensibilidad.

Las reflexiones correspondientes a esta λ son básicamente eliminadas, sin embargo las λ alrededor de los azules y los rojos aparecen mezcladas y dan como resultado un color residual púrpura o magenta.

Una eliminación completa de las coloraciones residuales no se puede conseguir con la depositación de una monocapa, sino que se debe recurrir a las depositaciones denominadas multicapa, conseguidas con la superposición de sucesivas capas de óxidos metálicos. Cada una de éstas produce un haz de ondas reflejadas. Estos haces de ondas están desfasados entre ellos, lo que provoca interferencias múltiples. De este modo se consiguen eliminar casi totalmente los colores extremos del espectro y quedan como colores residuales los verdes y amarillos ya que el ojo es más sensible a éstos.

La calidad y eficacia de estos tratamientos depende de la exactitud con que se consigan los espesores deseados, y como finalidad se debe conseguir:

- a) Reducir considerablemente las reflexiones y en consecuencia las imágenes parásitas.
- b) Aumentar la luz transmitida y consecuentemente la transparencia de la lente.
- c) Fuerte adherencia de la capa.
- d) Resistencia a la abrasión como mínimo igual a la de la lente sin tratar.
- e) Coloración residual discreta.



$$n = \sqrt{N}$$

$$e = \lambda/4n$$

Fig. 18.5

18.3 Tratamientos antirreflejantes sobre lentes orgánicas

La estructura de las capas delgadas está fuertemente condicionada por la temperatura de los substratos; cuanto más elevada es ésta, mejor es la cohesión. Las lentes orgánicas no pueden ser calentadas a temperaturas superiores a los 95°C sin que se altere su estructura básica. Esta limitación trae como consecuencia que los materiales más comúnmente usados como el fluoruro de magnesio (MgF_2) no queden adheridos al substrato ni adquieran la dureza que logran a temperaturas de 300°C.

Otra consecuencia es que a tan bajas temperaturas la extracción de gases del substrato es muy poco eficaz y se ve afectada la cohesión de la capa.

Por otro lado, los materiales minerales de las capas delgadas y los materiales orgánicos de las lentes tienen coeficientes de dilatación muy distintos. Esto implica que cuando ambas partes se someten a temperatura ambiente se creen fuerzas de compresión sobre la capa delgada y de extensión en la lente, dando como resultado un agrietamiento de la capa.

La solución a dichos problemas fue conseguir multicapas a partir de la mezcla de diversos óxidos refractarios de propiedades tanto físicas y químicas, como ópticas, adecuadas. Estos nuevos materiales junto a una depuración en las técnicas de control de todas las fases del proceso, han permitido conseguir que los tratamientos antirreflejantes sobre lentes orgánicas sean tan eficaces como en las minerales.

18.4 Métodos de producción de los tratamientos antirreflejantes

256

Los tratamientos antirreflejantes se consiguen por deposición de capas delgadas. Existen diversas técnicas de deposición pero en el campo de las lentes oftálmicas la más utilizada es la evaporación en alto vacío. Este tratamiento se realiza en las denominadas campanas de alto vacío.

Las lentes que van a ser tratadas se limpian cuidadosamente y se colocan sobre un soporte convexo que permite tratar varias lentes al mismo tiempo. Posteriormente se calientan a una temperatura de aproximadamente 300°C las minerales y a 95°C las orgánicas y se someten a movimientos rotatorios para garantizar la uniformidad de deposición. En la campana herméticamente cerrada se hace el vacío, a la presión de 10^{-6} torr, mediante bombas, a fin de que ninguna partícula del aire interfiera en la depositación. El material se somete a un calentamiento que puede ser producido por diversos métodos:

a) Por conducción de una corriente a través de un filamento (efecto Joule, evaporación térmica convencional). En este método el material a evaporar se coloca en una naveta y se somete a calentamiento por el paso de corriente. De este modo se genera el vapor que se condensa como una película sólida y se deposita de forma uniforme sobre la superficie de la lente. Este método tiene la limitación de que tan sólo pueden utilizarse materiales cuyo punto de fusión sea inferior al de la naveta o el crisol de soporte. Esta limitación no existe con el método del cañón de electrones.

b) Por bombardeo de un haz de electrones. La diferencia esencial entre el método del haz de electrones y el convencional radica en la forma de calentar el material que se quiere evaporar. En este método el calentamiento se consigue bombardeando el material con un haz de electrones y permite conseguir temperaturas muy elevadas por encima de su temperatura de evaporación, lo cual implica evaporaciones violentas que hacen que los electrones adquieran elevada energía cinética. El haz de electrones se genera dentro de una campana de vacío aplicando una alta tensión entre un filamento incandescente (cátodo) que se mantiene a tensión negativa respecto a un electrodo frío (ánodo).

Uno de los métodos más habituales empleado para la medida del grosor de las capas es el micro-oscilador de cuarzo. Sobre el cuarzo se va depositando la misma película de óxido metálico que sobre la lente. A medida que su grosor aumenta, aumenta de peso y su frecuencia de vibración varía. Cuando la frecuencia alcanza el valor predeterminado se obtiene sobre la lente el grueso de depósito deseado. Otro método de control de espesores es un dispositivo de medida de la reflexión y la transmisión de un sustrato de referencia.

Bibliografía

- ANTÓ, J. «Recubrimientos ópticos». *Ver y Oír* nº 39, Puntex, 1989.
- BOSCH, S.; ROCA, J. «Tratamientos antirreflejantes sobre vidrios oftálmicos». *Ver y Oír* nº 40, Puntex, 1989.
- CORNING FRANCE. «El vidrio y la óptica ocular». Fontainebleau-Avon, 1988.
- ESSILOR. «Antirreflejantes en lentes orgánicas». *Ver y Oír* nº 40, Puntex, 1989.
- PULKER, H.K. *Coatings on Glass vol. 6*. Elsevier, 1984.
- SALVADÓ ARQUÉS, J. «Evolución de la aplicación de los tratamientos antirreflejantes». *Ver y Oír* nº 39, Puntex, 1989.