
Artículos de revisión de tema

Resistencia a los impactos: una mirada óptica

Impact Resistance: An Optical Perspective

JIMMY FERNANDO REYES DOMÍNGUEZ*

RESUMEN

El objetivo de este artículo de revisión de tema es aportar información acerca de un aspecto que pocas veces se tiene en cuenta (principalmente por la falta de material documentado, escrito o publicado) en el momento de realizar una prescripción a una persona que requiera una ayuda óptica. Se analizará, desde diferentes puntos de vista, el aporte de un lente oftálmico a la seguridad y salud del paciente, con independencia del material en que se fabrique. La resistencia a los impactos de un sistema óptico depende de muchos aspectos, entre ellos: el espesor del lente, el índice de refracción del material, la curva base utilizada para su fabricación y la aplicación o no de tratamientos ópticos como el antirrayas, el antirreflejo y los fotosensibles. Todos los análisis de este tema se realizan a estudios basados en las indicaciones dadas por instituciones como ANSI (Estados Unidos), OLA (Estados Unidos), CSA (Canadá) y AS/NZS (Australia), para aplicar pruebas que miden la resistencia de lentes como Drop Ball Test, además de pruebas balísticas de velocidad y alto impacto. Se puede concluir que el policarbonato es el material más resistente y que el espesor central tiene relación directa con la fortaleza del lente. Adicionalmente, entre más plana sea la curvatura base, mayor es la fragilidad del material, y el tratamiento antirreflejo influye de manera directa en la disminución de la resistencia a los impactos, a diferencia de los tratamientos fotosensibles, los cuales no alteran esta propiedad.

Palabras clave: resistencia al impacto, Drop Ball Test, prueba balística, lentes oftálmicos.

* Optómetra, especialista en Gerencia de Mercadeo. Maestrante en Ciencias de la Visión, Universidad de La Salle, Bogotá, Colombia.

Cómo citar este artículo: Reyes Domínguez, J. F. (2013). Resistencia a los impactos: una mirada óptica. *Ciencia y Tecnología para la Salud Visual y Ocular*, 11 (2), 113-125.

ABSTRACT

The purpose of this review paper is to provide information about an aspect that is rarely taken into account (mainly due to the lack of documented material, either written or published) at the time of issuing a prescription for someone requiring optical aid. The contribution of an ophthalmic lens to the safety and health of the patient, regardless of the material it is manufactured with, was analyzed from different points of view. The impact resistance of an optical system depends on many aspects, including: lens thickness, the refractive index of the material, the base curve used for its manufacture and the application or not of optical treatments, such as anti-scratch, anti-glare and photosensitive. All analyzes of this issue are performed on studies based on indications given by institutions such as the ANSI (United States), OLA (United States), CSA (Canada) and AS/NZS (Australia), to apply tests that measure lens resistance, such as the Drop Ball Test, as well as speed and high impact ballistic tests. It can be concluded that polycarbonate is the most durable material and that center thickness is directly related to the strength of the lens. Furthermore, the flatter the base curvature is, the greater the fragility of the material, and the antiglare treatment directly affects the decrease in impact resistance, unlike photosensitive treatments, which do not alter this property.

Keywords: Impact resistance, drop ball test, ballistics testing, ophthalmic lenses.

INTRODUCCIÓN

Antes de hablar de la importancia que tiene para la salud y la protección visual la resistencia a los impactos que todo lente oftálmico debe ofrecer, es importante tener en cuenta algunos conceptos:

Resistencia (del lat. *resistentia*), desde el punto de vista médico, es la cualidad que permite soportar la fatiga, gracias a lo cual se prolonga un trabajo o una actividad sin que el rendimiento disminuya ni se afecten los órganos. Si la perspectiva es física, resistencia es la oposición a la acción de una fuerza ejercida sobre un cuerpo, sin romperse, deformarse o sufrir algún deterioro.

Impacto (del lat. *impactus*): según la Real Academia Española, este sustantivo tiene las siguientes definiciones: “1. m. Choque de un proyectil o de otro objeto contra algo. 2. m. Huella o señal que deja un proyectil. 3. m. Efecto de una fuerza aplicada bruscamente. 4. m. Golpe emocional producido por una noticia desconcertante”.

Flexión (del lat. *flexio*): de acuerdo con la Real Academia Española, flexión puede entenderse como: “1. f. Acción y efecto de doblar el cuerpo o algún miembro. 2. f. Encorvamiento transitorio

que experimenta un sólido elástico por la acción de una fuerza que lo deforma”.

Tensión (del lat. *tensio*): afirma la Real Academia Española esta palabra tiene dos acepciones: “1. f. Estado de un cuerpo sometido a la acción de fuerzas opuestas. 2. f. Fuerza de tracción a la que está sometido un cuerpo”.

CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LOS MATERIALES ÓPTICOS

Recordando la historia de los lentes oftálmicos inorgánicos (vidrio), que se obtenían por fusión de arena de sílice, carbonato sódico y caliza a una temperatura de 1500 °C, y entre los cuales se contaba el Crown que ofrecía un índice de refracción de 1,523 y un número Abbe de 59, así como el Flint con un índice de refracción de 1,700 y un Abbe de 40, estos lentes tenían como principales desventajas su densidad (3,5 y 4,5 g/cm³, respectivamente) y su alta fragilidad a los impactos.

El CR-39, con un índice de refracción de 1,498, se utiliza como material para fabricar lentes oftálmicos desde 1947 cuando Armolite Company lo introdujo como una resina (*diallyl diglycol carbo-*

nate) ideal para este fin. Este material orgánico y termoestable tiene como principales ventajas ofrecer una menor densidad ($1,32 \text{ g/cm}^3$) y una mayor resistencia, comparado con los lentes inorgánicos que pueden romperse más fácilmente cuando se enfrentan a impactos de pequeña índole.

En 1992, Industrias de Óptica S. A. (INDO) introdujo al mercado un material con un índice de refracción de 1,523 al que denominó Superfin (Artus *et al.*, 2008) y que pertenece a la misma familia química del CR-39, pero la mitad de su composición contiene un oligómero de poliéster aromático y una combinación significativa de sodio y calcio que, además de incrementar su índice de refracción, también modifica sus propiedades mecánicas, entre ellas la resistencia.

El policarbonato es un material considerado una resina termoplástica, con una estructura amorfa constituida por una sucesión de radicales carbonato y fenol. Como material se descubrió en 1928 y hacia 1955 se desarrolló su proceso de producción por medio de las empresas General Electric y Bayer, pero su uso en la óptica oftálmica data de hace pocos años (finales de los años setenta). Tiene un índice de refracción de 1,586 y una de las densidades más bajas ofrecidas por los lentes ($1,20 \text{ g/cm}^3$). Como desventaja se encuentra su poca resistencia a la abrasión, y por lo tanto la facilidad de rayarse, pero como beneficio presenta una alta resistencia a los impactos (dieciséis veces mayor que la del CR-39) y al calor (su punto de reblandecimiento es superior a los $140 \text{ }^\circ\text{C}$).

Los lentes con índice de refracción de 1,60 o MR8 aparecen en el mercado óptico en la segunda mitad del siglo xx. Adicionalmente al óxido de silicio, manejan un alto contenido de óxido de boro que hace que estos lentes de mediano índice sean más resistentes a los impactos que el CR-39, pero comparados con este generan una mayor dispersión cromática. Entre los lentes mencionados, PPG Industrial introdujo al mercado uno que ofrece la resistencia del policarbonato, con la calidad óptica del CR-39 e incluso del vidrio

y con una característica importante en este momento: ser liviano, con una densidad de $1,10 \text{ g/cm}^3$ (Yu, 2012). Su nombre comercial es Trivex y fue usado inicialmente en la fabricación de partes para helicópteros.

El índice de refracción de 1,67, conocido en el mercado también con el nombre de MR7, es un polímero de poliuretano que se obtiene a través de la copolimerización de disotiocianato y monómeros de politol. Su densidad es de $1,35 \text{ g/cm}^3$ y tiene una dispersión cromática más alta que el CR-39, ya que presenta un número Abbe de 32. Tiene una mayor flexión que los lentes con índice de refracción de 1,498, pero menor que el policarbonato. Los fabricantes de este tipo de material recomiendan su uso incluso en monturas tres piezas o al aire.

Los materiales con un índice de refracción de 1,70 y superior, habitualmente, se generan a partir de polímeros de politiosulfuro. Uno de sus principales inconvenientes es presentar una alta dispersión cromática (Abbe = 32), por lo que requieren la aplicación de tratamiento antirreflejo. Su principal ventaja es que son lentes estéticamente favorables, por su espesor central, con independencia de si la fórmula es negativa o positiva. Otra característica de estos lentes, es que en sus curvaturas tienen diseños esféricos, cualidad que ofrece al paciente una mejor calidad óptica.

Una vez analizados los diferentes materiales con los cuales se fabrican lentes oftálmicos, con sus respectivos índices de refracción, en la tabla 1 se comparan las principales características ópticas. Un aspecto importante para tener en cuenta es que las características mencionadas aplican para lentes oftálmicos fabricados mediante generadores convencionales y generadores Free Form.

Después de comparar de las características de los diferentes tipos de materiales que existen en el mercado para la fabricación de lentes oftálmicos, es importante saber —de acuerdo con sus propiedades mecánicas y posteriormente al paso

TABLA 1. Comparación de características ópticas en materiales con diferente índice de refracción

| N CARACTERÍSTICA | 1,498 | 1,523 | 1,586 | 1,600 | 1,670 | 1,700 |
|-------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Abbe | 58 | 46 | 30 | 36 | 32 | 32 |
| Densidad (g/cm ³) | 1,32 | 1,11 | 1,21 | 1,30 | 1,35 | 1,40 |
| Resistencia | Alta | Baja | Baja | Baja | Baja | Alta |
| Mín. espesor central (mm) | 2,0 | 1,4 | 1,2 | 1,5 | 1,3 | 1,4 |
| Transmisión (%) | 92 | 91 | 90 | 90 | 88 | 86 |

Fuente: elaboración propia.

por diferentes pruebas de resistencia— cómo es el comportamiento de la fractura que se puede producir en estos materiales orgánicos. Martínez *et al.* (2008) afirman que los lentes termoestables son más frágiles y tienen un comportamiento elástico, con muy poca deformación. La fractura de este tipo de lente mediante una técnica de torsión doble indica que las grietas se propagan con frecuencia de una forma inestable (no continua) que se denomina *stick-slip* (dientes de sierra), en contraste con los termoplásticos donde la propagación es continua y estable.

PRINCIPALES PRUEBAS DE RESISTENCIA A LOS IMPACTOS

Dentro de la pruebas más utilizadas para medir la resistencia de los lentes oftálmicos a los impactos se encuentra la denominada Drop Ball Test, que fue aprobada por la Food and Drug Administration (FDA) en 1971 (OLA, 1998) como procedimiento para garantizar el nivel de protección que un material ofrece, teniendo en cuenta que, adicionalmente, debe cumplir con un espesor mínimo exigido, incluso en los aditamentos que se utilizan en la protección industrial. Esta prueba consistía (Stephens, 1995) en dejar caer un balón de acero de 0,56 oz (15,8757 g) y 5/8 in (1,5875 cm) de diámetro a una altura de 50 in (127 cm) y una velocidad de 5 m/s. La energía del impacto para esta prueba se calculó a partir de la siguiente fórmula:

$$E = m \times g \times h$$

Donde E es la energía del impacto, medida en julios o newtons; m es la masa del balón que cae, medida en gramos; g es la constante gravitacional (9,8 m/s²) y h es la altura de caída del balón.

El espesor mínimo para un lente de alto impacto es de 2 mm. Sin embargo, los adelantos en los procesos de fabricación, polímeros y diseños de los lentes han eliminado esta recomendación. Es importante aclarar que cuando se habla de vidrio, este material se ubica en la categoría de impacto básico, por lo tanto, el grosor de un lente inorgánico debe ser de 3 mm como mínimo.

Las normas Z80.1 (lentes para uso de corrección óptica) y Z87.1 (lentes para uso industrial) de la American National Standards Institute (ANSI, 1997, 2003) tienen en cuenta los criterios de desempeño y los requisitos de prueba para cualquier dispositivo que proteja o esté frente a los ojos (incluyendo aquellos que cubren todo el rostro), especialmente contra las lesiones producidas por los impactos. En estas normas se incluyen los lentes graduados, los no graduados, caretas, visores, monturas de protección y respiradores de cara completa. Cuando se trata de lentes oftálmicos, se habla de dos tipos de protección (McMahon y Beckerman, 2007): la básica y la de alto impacto (figura 1). En el primer tipo se realiza la prueba Drop Ball Test convencional y en el segundo tipo se realizan modificaciones a la misma prueba, donde se cambia la velocidad de lanzamiento (45,72 m/s) por medio de equipos neumáticos y se usa un balón de 1/4 in (0,6743 cm) de diámetro. En monturas, visores y caretas solo se habla de protección de alto impacto, en consecuen-

cia, se debe realizar la prueba del Drop Ball Test con alta velocidad (figura 2). Para reconocer que un producto cumple con la clasificación anteriormente mencionada, los fabricantes deben poner las iniciales Z87.1 en caso de que cumpla con el impacto básico, y Z87.1+ si son de impacto alto.

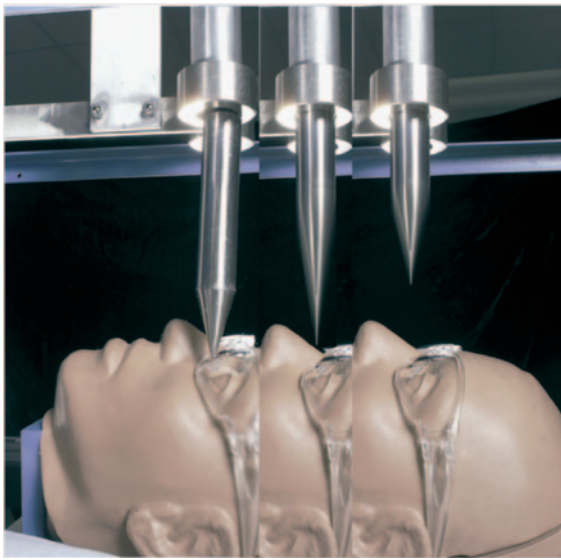


FIGURA 1. Prueba de resistencia de alto impacto

Fuente: McMahon y Beckerman (2007).



FIGURA 2. Prueba Drop Ball Test con alta velocidad

Fuente: McMahon y Beckerman (2007).

Como las normas se refieren a cualquier aditamento que esté frente a los ojos y cubra total o parcialmente el rostro (Glatt, 2003), la recomendación para proporcionar un mayor nivel de protección a las personas que necesiten una corrección óptica, es la de proteger sus ojos dentro de su sitio de trabajo, al igual que cuando se encuentren fuera

de este. Se debe tener en cuenta que las gafas de seguridad con prescripción deben manejar un espesor central mayor (se sugiere 3 mm) al espesor de 2 mm recomendado para las de uso diario, así estén fabricadas en el mismo material y con la misma fórmula.

La Canadian Standards Association (CSA, 2007) avala otra actividad que se usa para verificar la resistencia a los impactos, ofrecida por los lentes oftálmicos (también considerada en las norma ANSI), que incorpora una prueba balística que consiste en un solo golpe generado por una bola de acero de 1/4 in (0,6743 cm) de diámetro, propulsada por gas comprimido a velocidades desde 18 m/s (CSA Z94.3-92) hasta 45,7 m/s (CSA Z94.3-99). Oliver y Chou (1993) afirman que estas demostraciones se aproximan más a las condiciones reales de uso de unas gafas frente a un accidente o impacto recibido por el usuario. El Drop Ball Test es un procedimiento rápido y simple, pero se ha demostrado que una de las principales causas de lesiones oculares es generada por pequeñas partículas que viajan a altas velocidades, que nunca se podrán alcanzar con una prueba básica de resistencia.

Un aspecto que se debe tener en cuenta con cualquier prueba de resistencia a los impactos que se realice a los lentes oftálmicos es que son de vital importancia para la permanencia y recomendación de un material en el mercado óptico mundial. Se pueden comparar materiales que tengan características similares (Artús, 2008) e incluso buscar que los fabricantes mejoren las condiciones mecánicas de los existentes. Es importante aclarar que el peso y diámetro del balón metálico que se use en las pruebas, la altura o la velocidad que se le imprima y el tipo de equipo neumático que se utilice deben ser calculados con las características exigidas por el Drop Ball Test, para que sean validadas por las organizaciones que manejan y dictan los estándares internacionales correspondientes a este tema.

Los niveles de energía asociados a las pruebas de resistencia a los impactos (Chou, 2003) manejados

a nivel internacional, y que dan la calificación de aprobación para ser utilizados en la fabricación de elementos ópticos, son de 0,20 J para el Drop Ball Test convencional (Z80.1), de 0,80 J para el Drop Ball Test de alto impacto (Z87.1), para la prueba balística de 18 m/s (CSA Z94.3-92) es de 0,17 J, y para la prueba balística de 46 m/s (CSA Z94.3-99) es de 1,10 J.

OTROS ASPECTOS DE RESISTENCIA EN LENTES OFTÁLMICOS

Otra característica importante con respecto a la resistencia ofrecida por los lentes oftálmicos es hasta dónde sus propiedades mecánicas permiten hacer montajes en monturas de tres piezas o ranuradas (que se considera un método de bajo impacto). Si el material se recomienda para este tipo de aditamentos ópticos, se debe analizar el potencial de rompimiento, de agrietamiento y de cuarteamiento bajo tensión, ya que los lentes en este tipo de monturas tienen que pasar pruebas que miden estos riesgos. Martínez *et al.* (2009) reportan que el comportamiento de cualquier polímero en un impacto, una flexión o una tensión, antes de presentar una ruptura, es absorber en primera instancia parte de esa energía y deformarse, causando daños que no son perceptibles al ojo humano, pero que debilitan la matriz del lente; posteriormente, en cualquier otro impacto, incluso leve, el material se rompe con mayor facilidad. Ello indica que las ranuras y las perforaciones en los lentes, así el material esté indicado para estas monturas, debilita y altera su resistencia. Por lo tanto, para este tipo de montajes en los lentes se deben analizar aspectos como:

1. Resistencia a la tensión (*tensile strength*): que se define como la tolerancia que los lentes ofrecen a una fuerza que genera tensión, donde entre más alto sea el valor, más resistente es el material a desarticularse.
2. Módulo de elasticidad (*modulus of elasticity*): que analiza la flexibilidad ofrecida por un ma-

terial óptico: entre más alto sea el valor, más resistente es el material a doblarse.

3. Resistencia al rompimiento (*stress at break*): que es la oposición que ofrece un lente a una tensión que pueda generar rompimiento. Entre más alto sea el valor, más resistente es el material a fracturarse.

Los tres conceptos anteriores se miden en megapascuales (MPa), una medida de presión del Sistema Internacional de Unidades que se define como la presión que ejerce una fuerza sobre una superficie determinada.

Otro aspecto que se analizó para la elaboración de este artículo es hasta dónde interfiere la curva base de un lente oftálmico en la resistencia a los impactos que este pueda tener. Diallo *et al.* (2001) analizaron este concepto en 180 lentes fabricados en tres materiales de índice de refracción diferente (CR-39, policarbonato y 1,60), de diseño esférico, en fórmulas de -4,00 Dpt, con 2 mm de espesor central y 50 mm de diámetro. Los lentes estaban distribuidos en cinco grupos, correspondientes a curvas bases de 0,50, 2,50, 4,50, 6,50 y 8,50 Dpt, de dos diferentes laboratorios (figura 3). El impacto se realizó con una bola de acero de 6,743 mm de diámetro. Los resultados confirmaron que el policarbonato es mucho más resistente a la ruptura que los otros materiales y que el CR-39 es el material menos resistente a los impactos (Corzine *et al.*, 1996), con independencia de la curva base. El principal aporte de este estudio fue demostrar que la curva base tiene una relación directa con la resistencia de los lentes oftálmicos fabricados en cualquier material, donde entre más plana sea la curvatura, menor es la resistencia ofrecida por el material a los impactos (tabla 2).

TRATAMIENTOS ÓPTICOS Y RESISTENCIA A LOS IMPACTOS

En algunas oportunidades se tienen dudas con respecto al aumento o la disminución de la resistencia

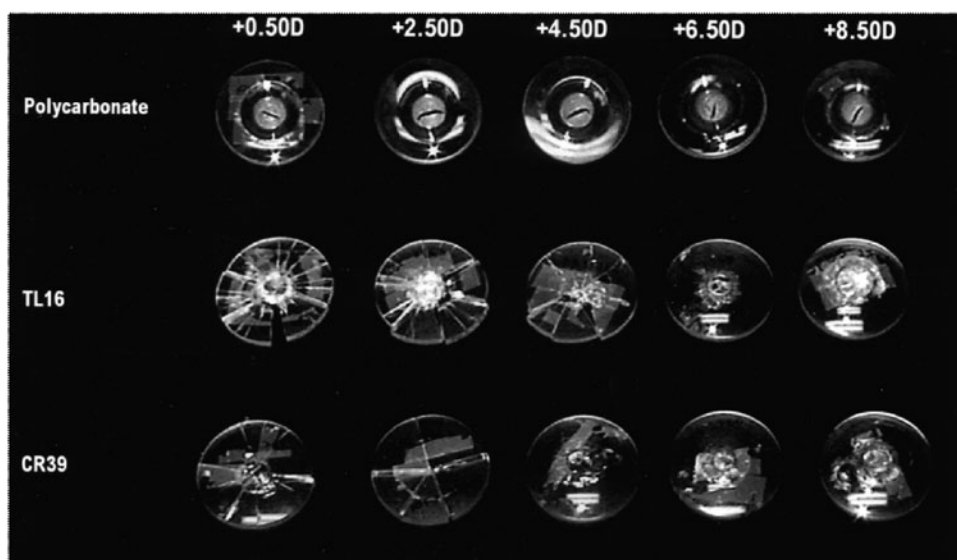


FIGURA 3. Prueba resistencia de tres índices de refracción en diferentes curvas bases

Fuente: Diallo *et al.* (2001).

TABLA 2. Relación curva base de los lentes y su resistencia al impacto

| Curva Base (D) | LABORATORIO ÓPTICO A | | | | | LABORATORIO ÓPTICO B | | | | |
|-------------------------------|----------------------|--------|--------|--------|--------|----------------------|--------|--------|--------|--------|
| | +0,50 | +2,50 | +4,50 | +6,50 | +8,50 | +0,50 | +2,50 | +4,50 | +6,50 | +8,50 |
| CR-39 | | | | | | | | | | |
| Media energía de fractura (J) | 0,586 | 0,902 | 1,203 | 1,923 | 2,522 | 0,401 | 0,778 | 1,192 | 1,465 | 2,044 |
| Desviación estándar (J) | 0,090 | 0,113 | 0,187 | 0,231 | 0,540 | 0,062 | 0,149 | 0,081 | 0,093 | 0,142 |
| TL16 | | | | | | | | | | |
| Media energía de fractura (J) | 8,456 | 9,644 | 10,344 | 11,485 | 12,404 | 7,169 | 7,728 | 8,219 | 9,151 | 11,569 |
| Desviación estándar (J) | 1,121 | 0,302 | 0,341 | 0,583 | 0,694 | 0,730 | 0,455 | 0,215 | 0,362 | 0,575 |
| Policarbonato | | | | | | | | | | |
| Media energía de fractura (J) | 28,518 | 30,904 | 33,419 | 34,941 | 36,905 | 20,832 | 23,284 | 26,267 | 30,787 | 35,587 |
| Desviación estándar (J) | 0,676 | 1,514 | 0,494 | 0,609 | 0,868 | 0,841 | 1,031 | 1,543 | 2,020 | 0,944 |

Fuente: traducción de Diallo *et al.* (2001).

de un lente oftálmico a los impactos, cuando a este se le aplica algún tratamiento adicional como el antirraya, el antirreflejo o el fotosensible.

Los tratamientos antirraya, también denominados de endurecimiento (Samson, 1996), pueden ser aplicados por *dipping* (inmersión) o *spining* (disparo). No son más que lacas de dióxido de silicio (SiO_2) que buscan dar mayor resistencia a los lentes, desde el punto de vista de duración, respecto a las rayas, y no de mayor resistencia a los impactos.

Otra función importante de este tratamiento es ser la primera capa para la aplicación del antirreflejo y lograr que la compatibilidad entre los dos tratamientos permita una mejor adhesión y duración del antirreflejo. Con independencia de la forma de aplicación de este tratamiento, la resistencia que ofrece a la abrasión (Martínez, 2000) está íntimamente relacionada con el tiempo y la temperatura del curado, sin importar el material y el índice de refracción en que esté fabricado el lente.

Dentro de los primeros estudios realizados con respecto a los tratamientos aplicados a los lentes oftálmicos, Samson (1996), quien tenía vínculos laborales con Sola Internacional (actualmente Carl Zeiss Vision), describió que era importante tener en cuenta las propiedades físicas ofrecidas por un tratamiento antirreflejo (AR); por lo tanto, su adhesión debe ser totalmente controlada, ya que la aplicación de los sustratos se realiza a elevadas temperaturas que pueden afectar la composición del material en que están fabricados los lentes, y ello interfiere incluso en sus características mecánicas. Adicionalmente, afirma que también se debe controlar el espesor final de esta capa, ya que puede afectar la calidad óptica ofrecida por el lente, sin tener nada que aportar a su resistencia por ser más gruesa. Es importante aclarar que el manejo adecuado de la aplicación de un AR mejora las condiciones de resistencia y calidad del mismo tratamiento. No se debe olvidar que cuando se aplica antirreflejo, además de medir la resistencia del material en que esté fabricado el lente, también se utilizan pruebas de estrés como ASTM D794 (calor seco), ASTM D543 (solventes químicos), ASTM D4329 (exposición a luz UV) y DIN 58196 (agua salada hirviendo), para verificar la resistencia y dureza del AR.

Habitualmente, los estudios que se realizan, comparan lentes de un mismo material, donde algunos presentan la aplicación de uno o más tratamientos y otros no los tienen, y luego se enfrentan a una prueba que mide su resistencia al impacto. Por ejemplo, Chou (2003) utiliza doce grupos de veinte lentes, de fórmula neutra, en material de índice de refracción de 1,53. Uno de los grupos no tiene tratamiento alguno, siete grupos manejan diferentes tipos de antirrayas y cuatro grupos tienen diferentes tipos de antirreflejos más antirrayas. El espesor central para los lentes es de 3 mm en diez grupos, 2,5 mm para un grupo con antirraya y 2 mm para un grupo con antirraya. Por medio de una prueba balística, realizada con una pistola neumática que dispara un balón de acero de 6,5 mm de diámetro al centro del lente, a una velocidad de 18 m/s (figura 4), si el lente resistía se realizaba un segundo disparo a un nuevo lente (con las mismas características), pero con una velocidad de 46 m/s. Si al segundo disparo el lente resistía, se realizaba un cálculo para una nueva velocidad de impacto sobre un tercer lente de iguales condiciones ópticas. Se concluye que los lentes que tienen combinación de tratamientos (antirreflejo + antirrayas) presentan menor resistencia a los impactos. Los lentes con antirrayas

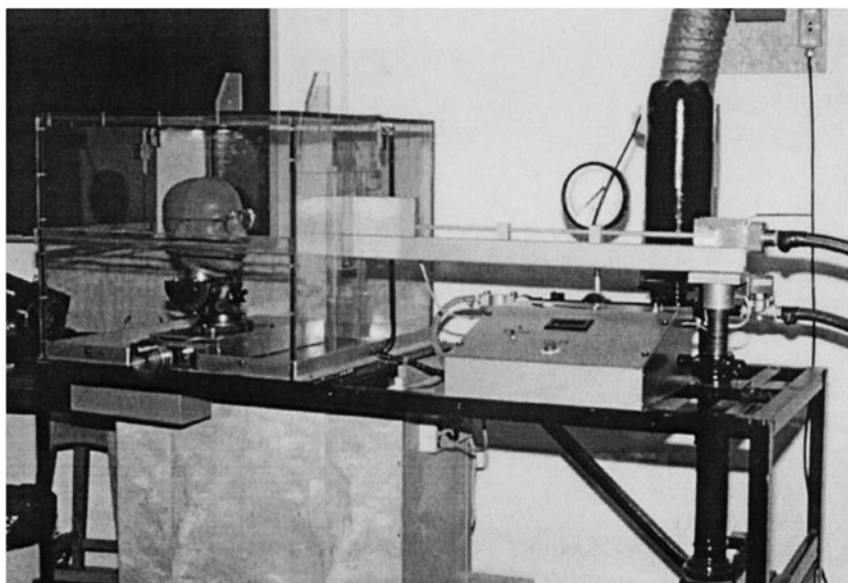


FIGURA 4. Prueba balística con pistola neumática

Fuente: Chou (2003).

presentan una mejor respuesta a los impactos, pero definitivamente los lentes sin ningún tipo de tratamiento tienen mejor respuesta y mayor resistencia a los impactos, pues presentaron daño con disparos a velocidades de $63,97 \pm 5,46$ m/s. Esta conclusión había sido ya confirmada en otro estudio realizado por Corzine (1996) para lentes en material CR-39. En todos los estudios se considera daño del lente si se rompe en dos o más segmentos, si se agrieta o fisura, si hay pérdida de material en alguna de sus superficies y/o si se sale o es expulsado de la montura.

Analizando otro tipo de material óptico, Chou (2005) verificó el comportamiento del policarbonato. A este fin tomó cuatro grupos de fórmula neutra. Dos de los grupos tenían únicamente tratamiento antirrayas, que lo traen por fabricación (un grupo con espesor central de 2 mm y otro de 3 mm). Los otros dos grupos, con antirreflejo aplicado sobre el antirrayas (con las mismas características de espesor central mencionadas para los grupos anteriores), con un bisel de 50 mm de diámetro para todas las muestras. Los lentes fueron impactados por un misil que consistía en una aguja de máquina de coser industrial (de 0,862 g), montada en un cilindro de aluminio de 6,4 mm de diámetro y 2,5 cm de largo. Estos artefactos fueron capaces de penetrar los lentes (figura 5) a velocidades entre los 29,58 y los 46,19 m/s. Presentaron una baja resistencia aquellos lentes que tenían menor espesor central y recubrimiento antirreflejo. El estudio también concluyó que el policarbonato es resistente a los impactos con objetos contundentes (como balines), pero más susceptible a impactos con misiles puntiagudos (como agujas). Por esta razón, Rychwalsky *et al.* (2003) indican que aun cuando el policarbonato ofrezca un grado superior de resistencia a los impactos y a la penetración comparado con otros materiales, las recomendaciones actuales sobre el uso de esta resina en lentes de prescripción y de protección, según lo aprobado por la Academia Americana de Oftalmología y la Academia Americana de Pediatría, deben ser revaluadas y analizadas de acuerdo con las últimas investigaciones realizadas.

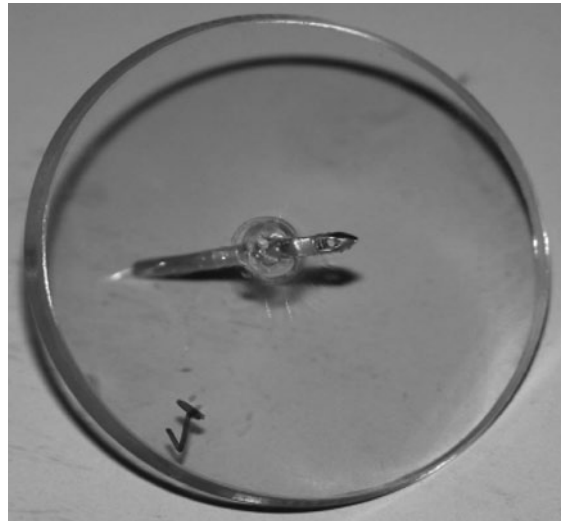


FIGURA 5. Prueba de impacto con misiles puntiagudos

Fuente: Chou (2005).

Los lentes con índice de refracción de 1,60 también se analizaron después de la aplicación de tratamientos ópticos (Chou, 2006). A este efecto se tomaron cuatro grupos de lentes con fórmula neutra y un espesor central de 2 mm para un grupo y de 3 mm para otro grupo, todos con un diámetro de 50 mm. Para cada uno de los espesores se tomaron lentes que tenían solamente antirrayas y otros que adicionalmente a este tratamiento recibieron antirreflejo. En este estudio se compararon los estándares entregados por la CSA (2007) de Canadá y la AS/NZS (1992) de Australia. Las velocidades en este estudio fueron de 50 a 62 m/s, generados a un balón de acero de 6,35 mm de diámetro, disparado por una pistola neumática. Este análisis concluye que al igual que los lentes CR-39 y policarbonato, los lentes de índice de refracción de 1,60 con antirreflejo presentan menor resistencia a los impactos que los lentes del mismo índice de refracción que no tienen este tratamiento.

En los estudios realizados a los diferentes índices de refracción, siempre se tuvo en cuenta el espesor central, pero Chou *et al.* (2011) analizaron también el espesor de borde de los lentes, teniendo en cuenta un diámetro de bisel de 50 mm, y demostraron que cuando los bordes son delgados y se presenta un impacto sobre el aditamento óptico,

pueden suceder dos cosas: la primera que el lente se rompa, y la segunda (que también se considera peligrosa) que el lente salga de la montura y golpee directamente el ojo junto con el elemento que lo impactó. Cuando el espesor del borde es más grueso, con independencia del material y la prescripción, el lente presenta mayor rigidez y resistencia a abandonar la montura en caso de un impacto, por presentar poca flexión. Por eso se puede afirmar que los lentes de protección industrial deben tener un mayor espesor, tanto en el centro como en la periferia, para cumplir con la función para la cual fueron diseñados.

Tras el análisis de los diferentes estudios, se puede afirmar que el tratamiento antirreflejo influye de manera directa en la disminución de la resistencia a los impactos ofrecida por cualquier material usado en la fabricación de lentes oftálmicos, con independencia de su espesor central (tabla 3).

Algunas investigaciones están enfocadas a verificar y analizar la relación existente entre la resistencia de los lentes a los impactos y la aplicación a estos de un tratamiento fotosensible. El análisis realizado por Chou (1995) a sesenta lentes fotosensibles en material CR-39, entre los que se encontraban

lentes visión sencilla, bifocales Flat Top con un segmento para visión próxima de 28 mm y lentes progresivos. La fórmula para todos los lentes era neutra o -4,00 Dpt, y en el caso de los bifocales y progresivos con una adición de 2,00 Dpt. Los sesenta lentes se subdividieron en dos grupos: el primero con tratamiento antirrayas (tres diferentes referencias) y el segundo sin ningún tipo de tratamiento adicional al fotosensible. Es importante aclarar que como el estudio incluyó lentes para la corrección de la presbicia, se buscaba analizar la resistencia a los impactos ofrecida por un material que presenta discontinuidad en la curva base por su diseño y segmento de visión próxima. Cada uno de los grupos anteriormente mencionados se dividió en tres subgrupos: el primero recibía un único impacto a una velocidad de 18 m/s, el segundo recibía cincuenta impactos consecutivos a la misma velocidad y el tercero un solo impacto a 46,5 m/s. El impacto en todos los grupos era realizado con un rifle neumático y un balón de acero de 6,5 mm de diámetro. Todos los lentes resistieron el primer impacto a 18 m/s; por lo tanto, afirmó que el diseño del lente (monofocal, bifocal y progresivo) y la aplicación de un tratamiento fotosensible no afectan la resistencia a los impactos, siempre y cuando se cumpla con los

TABLA 3. Disminución de la resistencia a los impactos por antirreflejo

| TRATAMIENTO | SIN TRATAMIENTO | ANTIRRAYAS | ANTIRREFLEJO | ANTIRRAYAS + ANTIRREFLEJO |
|-------------------------------|-----------------|------------|--------------|---------------------------|
| n = 1,498 | | | | |
| Esesor (mm) | 2,406 | 2,477 | 2,414 | - |
| Media energía de fractura (J) | 1,110 | 0,473 | 0,410 | - |
| n = 1,53 | | | | |
| Esesor (mm) | - | 2,0 | - | 2,0 |
| Media energía de fractura (J) | - | 1,550 | - | 1,280 |
| n = 1,53 | | | | |
| Esesor (mm) | - | 3,0 | - | 2,0 |
| Media energía de fractura (J) | - | 2,030 | - | 1,520 |
| n = 1,586 | | | | |
| Esesor (mm) | - | 2,0 | - | 2,0 |
| Media energía de fractura (J) | - | 2,030 | - | 1,730 |
| n = 1,586 | | | | |
| Esesor (mm) | - | 3,0 | - | 3,0 |
| Media energía de fractura (J) | - | 4,220 | - | 2,480 |

Fuente: valores tomados de Chou (2003, 2005).

espesores centrales mínimos requeridos de acuerdo con las normas internacionales de fabricación y protección.

Aunque quienes han estudiado la resistencia a la abrasión ofrecida por los tratamientos ópticos, describen que las técnicas no se parecen a la realidad enfrentada por los lentes usados por un paciente, una importante prueba que se realiza mediante nanoindentación instrumentada y microscratch, fue llevada a cabo teniendo en cuenta el análisis de dichos daños, después de generar estrés sobre la superficie de los lentes y analizar por medio de microscopios de alta definición (ZEISS Ultra) los daños sufridos por el material, especialmente de las capas antirrayas y en la capa hidrofóbica aplicada a los antirreflejos de últimas generaciones (Caro *et al.*, 2011). El estudio citado fue realizado con materiales de índices de refracción de 1,498, 1,523 y 1,67. Algunos lentes se cubrieron con cuatro tratamientos antirrayas de diferentes fabricantes y un tratamiento antirreflejo común para todos. Se realizó una abrasión sobre los lentes con una punta de diamante (nanoindentación) a velocidad, presión y dirección constantes, y luego se midió la profundidad de penetración del daño generado a la superficie del lente. Posteriormente, se hizo la prueba de Colts de Bayer (*microscratch*), en la cual se genera fricción sobre la superficie del lente con una goma y una esponjilla metálica determinado número de veces (aproximadamente seiscientas), con presión y velocidad constantes. Luego se analizó el porcentaje de transmisión de luz a través de los lentes, para determinar cuánto afecta la calidad visual el daño producido por la abrasión sobre la superficie de un lente oftálmico. Se concluyó que el material CR-39 es el más resistente a la abrasión, que los tratamientos antirraya mejoran las condiciones de resistencia de todos los materiales y que el tratamiento antirreflejo disminuye la resistencia de los lentes frente a la abrasión.

La principal causa del daño sufrido por una superficie óptica se debe al desgaste abrasivo inducido por las malas técnicas de limpieza y la inadecuada manipulación de los lentes oftálmicos. Esto faci-

lita la penetración dinámica de tipo acumulativo de partículas (especialmente de polvo), bajo los tratamientos e incluso en la matriz del lente. Es importante tener en cuenta que las condiciones de temperatura y humedad del ambiente también pueden afectar la calidad de un tratamiento óptico y, por consiguiente, la resistencia del material.

CONCLUSIONES

En cuanto a los materiales, el lente que mayor resistencia presenta a los impactos, por sus características de flexión y tensión es el policarbonato, aunque paradójicamente es el material que más fácil se raya, a diferencia del CR-39 que es el material más resistente a la condición de abrasión.

El espesor central está directamente relacionado con la resistencia a los impactos. En el caso de los lentes usados para corregir una ametropía se recomiendan 2 mm; sin embargo, los adelantos en los procesos de elaboración, los polímeros usados y los diseños de los lentes hacen que los fabricantes recomienden valores inferiores, sin poner en riesgo la seguridad del paciente. Si se trata de lentes para protección industrial, el espesor mínimo es de 3 mm. Si los valores son inferiores a esta recomendación, los lentes no son aceptados.

La curva base tiene una relación directa con la fortaleza de los lentes oftálmicos fabricados en cualquier material, donde entre más plana sea la curvatura, menor es la resistencia ofrecida a los impactos. Por eso no es recomendable cambiar la curva base para lograr una mejor estética, porque ello además de afectar la calidad óptica y los procesos de adaptación, pone en riesgo la seguridad e integridad del paciente.

Con respecto a los tratamientos ópticos, es importante tener en cuenta que el antirrayas aplicado a cualquier material ofrece mayor resistencia desde el punto de vista de duración (rayas), pero no respecto a los impactos. El tratamiento antirreflejo influye de manera directa en la disminución de la

resistencia a los impactos de los lentes oftálmicos, sin importar el material en que estén fabricados ni su espesor central. Finalmente, un tratamiento fotosensible no afecta la resistencia de los lentes a los impactos, siempre y cuando se cumpla con los espesores centrales mínimos requeridos de acuerdo con las normas internacionales de fabricación y protección.

REFERENCIAS

- American National Standard Institute (1997). *Requirements for ophthalmic lenses*. ANSI Z80.1-1997.
- American National Standards Institute (2003). *Standard practice for occupational and educational eye and face protection*. ANSI Z87.1-2003.
- Artús, P., Dürsteler, J. C. y Martínez, A. B. (2008). Low-energy dynamic indentation method for analysis of ophthalmic materials. *Optometry and Vision Science*, 85 (1), 49-53.
- Artus, P., Dürsteler, J. C., Martínez, A. B. y Segovia, A. (2008). Comportamiento al impacto de materiales para lentes oftálmicas. *Anales de Mecánica de la Fractura*, 2 (25), 510-515.
- Canadian Standards Association (2007). *Eye and face protectors*. CSA Z94.3-07.
- Caro, J., Cuadrado, N., González, I., Casellas, D., Prado, J. M., Vilajoana, A. y Dürsteler, J. C. (2011). Microscratch resistance of ophthalmic coatings on organic lenses. *Surface & Coatings Technology*, 205, 5040-5052.
- Chou, B. R. y Fong, W. K. (1995). Impact resistance of transitions plus spectacle lenses. *Optometry and Vision Science*, 72 (9), 608-611.
- Chou, B. R. y Hovis, J. K. (2003). Durability of coated CR-39 Industrial Lenses. *Optometry and Vision Science*, 80 (10), 703-707.
- Chou, B. R. y Hovis, J. K. (2006). Effect of multiple antireflection coatings on impact resistance of Hoya Phoenix spectacle lenses. *Clinical and Experimental Optometry*, 89 (2), 86-89.
- Chou, B. R., Gupta, A. y Hovis, J. K. (2005). The effect of multiple antireflective coatings and center thickness on resistance of polycarbonate spectacle lenses to penetration by pointed missiles. *Optometry and Vision Science*, 82 (11), 964-969.
- Chou, B. R., Yuen, G. y Dain, S. J. (2011). Ballistic impact resistance of selected organic ophthalmic lenses. *Clinical and Experimental Optometry*, 94 (6), 568-574.
- Corzine, J. C., Greer, R. B., Bruess, R. D., Lee, G. K. y Scaief, A. L. (1996). Effects of coatings on the fracture resistance of ophthalmic lenses. *Optometry and Vision Science*, 73 (1), 8-15.
- Diallo, M. L., Simonet, P., Frenette, B. y Sanschagrin, B. (2001). Resistance of plastic ophthalmic lenses: The effect of base curve on different materials during static load testing. *Optometry and Vision Science*, 78 (7), 518-524.
- Glatt, L. y Morewitz, B. (2003). Practice strategies: A new standard in eye protection. *Optometry*, 74 (9), 599-606.
- Martínez Urreaga, J., Matías, M. C., Lorenzo, V. y de la Orden, M. U. (2000). Abrasion resistance in the tumble test of sol-gel hybrid coatings for ophthalmic plastic lenses. *Materials Letters*, 45, 293-297.
- Martínez, A. B., Artús, P., Dürsteler, J. C. y Arencón, D. (2009). Low energy dart test for mechanical evaluation of ophthalmic materials. *Optometry and Vision Science*, 86 (8), 979-987.
- Martínez, A. B., Artús, P., Dürsteler, J. C. y Arencón, D. (2008). Comportamiento a la fractura de materiales para lentes oftálmicas. *Anales de Mecánica de la Fractura*, 1 (25), 269-274.
- McMahon, J. M. y Beckerman, S. (2007). Testing safety eyewear: How frame and lens design affect lens retention. *Optometry*, 78, 78-87.
- Oliver, A. R. y Chou, B. R. (1993). A ballistic evaluation of the impact resistance of spectacle lens materials. *Optometry and Vision Science*, 70 (10), 822-827.
- Optical Laboratory Association (OLA) (1998). *Impact resistance compliance guide: Street/dress eyewear (not industrial eyewear)*. OLA, 3.
- Rychwalski, P. J., Packwood, E. A., Cruz, O. A. y Holds, J. B. (2003). Impact resistance of common spectacle and safety lenses to airgun and rimfire projectiles. *Journal of American Association for Pediatric Ophthalmology and Strabismus*, 7 (4), 268-273.

Samson, F. (1996). Ophthalmic lens coatings. *Surface and Coatings Technology*, 81, 79- 86.

Standards Australia (1992). *Eye protectors for industrial applications*. Standards Australia. AS/NZS 1337.

Stephens, G. L. (1995). Statistical procedures for impact resistance testing and increased drop-ball heights. *Optometry and Vision Science*, 72 (8), 565-572.

Yu, P. (2012). Trivex lens material: The technology behind the triple benefit. *Research and Development*, (12), 1-4.

Recibido: 24 de julio del 2013
Aceptado: 3 de octubre del 2013

CORRESPONDENCIA
Jimmy Fernando Reyes Domínguez
jimfreyes@unisalle.edu.co

