

Dispersión y número Abbe

Claudia Perdomo* / Jaime Bohórquez Ballén**

RESUMEN

Las alternativas que existen en cuanto a materiales y diseños de lentes oftálmicos, hacen que el decidir el lente ideal para una determinada prescripción sea una tarea difícil, claro está, si no se conocen a fondo las propiedades ópticas y físicas de los mismos. En el presente trabajo se describe cómo el índice de refracción de un material depende de la longitud de onda de la luz a través de la polarización eléctrica, dando lugar al proceso de dispersión. En lentes oftálmicos, la dispersión cromática está caracterizada por el número Abbe. Se muestran algunas definiciones para este valor, su importancia y como minimizar sus efectos en los lentes oftálmicos.

Palabras clave: índice de refracción, número Abbe, dispersión cromática.

DISPERSION AND ABBE NUMBER

ABSTRACT

The current alternatives regarding materials and designs of ophthalmic lenses makes difficult to decide the ideal lens for a specific prescription, of course if optical and physical properties are not known in depth. This article describes how the refraction index of a material depends on the light wave longitude through electrical polarization, producing the dispersion process. In ophthalmic lenses, chromatic dispersion is characterized by the Abbe number. Some definitions for this number, its importance and how to minimize its effects in ophthalmic lenses are also shown.

Key Words: refraction index, Abbe number, chromatic dispersion.

* Optómetra Universidad de La Salle. Especialista en Cuidado Ocular Primario, Universidad Fundación del Área Andina. Correo electrónico: cperdomo@lasalle.edu.co

** Físico Universidad Nacional de Colombia, Magíster en Física, Universidad de Los Andes. Correo electrónico: jbohorquez@lasalle.edu.co

Fecha de recepción: marzo 22 de 2006.

Fecha de aprobación: abril 7 de 2006.

DISPERSIÓN Y NÚMERO ABBE

En óptica, es de particular interés entender el comportamiento de la luz al interactuar con materiales transparentes dieléctricos, ya que generalmente se trabajan con lentes plásticos. Cuando la luz viaja en un medio material su velocidad de propagación disminuye con respecto de su valor en el vacío (la luz se propaga en el vacío con una velocidad aproximada de $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$). Una forma de cuantificar la disminución de la velocidad de la luz al viajar por un medio material es a través del índice de refracción (n), el cual se define como:

Donde c es la velocidad de la luz en el vacío y v es la velocidad de la luz en el material (Hecht, 1986). La dependencia del índice de refracción del material con la longitud de onda de la luz (color) es un fenómeno bastante conocido, al que se denomina dispersión. Newton logró dispersar la luz blanca en sus colores constituyentes con la ayuda de un prisma de vidrio, aunque postuló erróneamente que la luz viajaba más rápidamente en el vidrio que en el aire.

La luz es un campo electromagnético que interactúa con las moléculas del material. Esta interacción hace que la carga eléctrica de las moléculas se separe en positiva y negativa, lo que se conoce como *polarización eléctrica* (Born, 1980; Hecht, 1986). La polarización genera un campo eléctrico dentro del material que se suma al campo externo (la luz), por lo que la velocidad de propagación de la luz dentro del material se ve afectada.

La redistribución de carga eléctrica se puede dar por varios mecanismos:

- ◆ Existen moléculas que generan dipolos eléctricos naturalmente ya que comparten de forma desigual los electrones de sus átomos (moléculas

polares). En ausencia de campos eléctricos, la orientación de estas moléculas es aleatoria debido a la agitación térmica. Al interactuar con campos eléctricos estas moléculas tienden a orientarse en la dirección del campo externo, y se dice que el dieléctrico ha tomado una *polarización orientacional*.

- ◆ Para el caso de moléculas o átomos no polares, la presencia de un campo eléctrico externo distorsiona la distribución de carga, desplazando la nube de electrones (carga negativa) con respecto del núcleo (carga positiva). Este proceso se conoce como *polarización electrónica*.
- ◆ Para estructuras cristalinas (por ejemplo el NaCl), la aplicación de campos eléctricos genera un desplazamiento de los iones negativos con respecto de los positivos, lo que se conoce como *polarización iónica*.

Cuando materiales dieléctricos (lentes) se someten a campos eléctricos externos, las cargas eléctricas internas experimentarían fuerzas y/o torques variables en el tiempo. Para dieléctricos polares, las moléculas sufren rotaciones que tienden a alinearlas en dirección del campo externo, pero si la frecuencia del campo externo es alta; debido al momento de inercia relativamente alto de estas moléculas; estas no podrán alinearse en la dirección del campo externo y por lo tanto su contribución al campo total se hará pequeña, mientras que los electrones, debido a su masa pequeña, pueden responder a los campos externos aún a frecuencias ópticas. Por lo tanto, la dependencia del índice de refracción con la frecuencia (o la longitud de onda) es el resultado de varios procesos de polarización dentro de las moléculas del dieléctrico.

En lentes delgadas o gruesas, la dependencia del índice de refracción con la longitud de onda da lugar a las aberraciones cromáticas. Por ejemplo, la

distancia focal de una lente delgada (Jenkins, 1957; Sears, 1971) con radios de curvatura R_1 , R_2 e índice de refracción n , en el aire está dada por:

ya que el índice de refracción varía con la longitud de onda, la distancia focal de la lente también lo hará, esto es, como el índice de refracción decrece con la longitud de onda, la distancia focal de la lente aumentará con la longitud de onda. Si se ilumina la lente con un haz de luz blanca, habrá un punto focal para la luz de color violeta, a continuación un punto focal para la luz de color azul y así hasta llegar a un punto focal para la luz de color rojo.

Ya que la designación de longitudes de onda como rojo, amarillo, azul es bastante imprecisa, se acostumbra especificar líneas espectrales cuyas longitudes de onda se conocen con precisión. Las líneas de Fraunhofer sirven como marcas de referencia dentro del espectro visible (Born, 1980) (ver Tabla 1).

$$\frac{1}{f} = (n-1) \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$$

Para cuantificar el índice de refracción, se debe referir a una longitud de onda determinada (λ) y para ello se asigna un subíndice que la indica (n_λ). Los más comúnmente utilizados en Óptica Oftálmica son n_D , n_d y n_e que corresponden respectivamente, a la línea amarilla del sodio, el helio y a la línea verde del mercurio (Arqués, 2000).

En la fabricación de lentes oftálmicos de diversos índices de refracción, si se utilizan índices de refracción que no sean los básicos o correspondientes a la raya D, d y e será preciso acompañarlo de la referencia correspondiente, ya sea la raya de Fraunhofer o la longitud de onda (Wakefield, 2000).

Debemos tener en cuenta que en el Reino Unido y los Estados Unidos, el índice de refracción se mide

actualmente en la línea d del helio (longitud de onda 587,56nm), mientras que en Europa es medido en la línea e del mercurio (longitud de onda 546,07nm). Es importante tener en cuenta que el valor de n_e es un poco superior al de n_d , de modo que, cuando se da el valor de n_e , el material parece tener un índice de refracción ligeramente superior.

Con la creación de nuevos polímeros (materiales plásticos) para lentes oftálmicos, se ha logrado incrementar el índice de refracción, con el fin de fabricarlos más planos, más livianos y de menor peso (Plata, 2000), por lo tanto, el índice de refracción tiene un importante papel para los diferentes materiales, una de las formas de clasificarlos es de la siguiente manera (Jalie, 2003):

- Índice normal n_e 1,48 pero < 1,53
- Índice medio n_e 1,53 pero < 1,64
- Índice alto n_e 1,64 pero < 1,74
- Índice muy alto n_e 1,74

El número Abbe, V-número o constringencia de un material transparente es una medida de la dispersión de un material. Se le llama así en honor al físico alemán Ernst Abbe (1840-1905), quien lo definió.

Para cuantificar el valor de la dispersión cromática se utiliza el número Abbe de un material V (Schcolnicov, 1957) y se define como:

$$V = \frac{n_D - 1}{n_F - n_C}$$

Donde n_D , n_F y n_C son los índices de refracción del material para las longitudes de onda de las líneas espectrales de Fraunhofer D, F y C.

El número Abbe es adimensional, se utiliza para clasificar materiales transparentes y solo es útil para medir la dispersión de la parte visible del espectro electromagnético (Bruneni, 1993).

Valores elevados de Abbe indican menor dispersión que los valores menores y son los más deseables óptimamente (Acosta, 1995).

El ojo humano tiene un valor Abbe de 45, por lo cual nos debe preocupar los materiales que tengan un valor menor. Los números Abbe para materiales de lentes oftálmicos se encuentran entre 60 y 30 (Troy, 1996). Por ejemplo, CR-39 considerado un material cromático bajo, tiene un valor Abbe de 58, el policarbonato que se considera un material altamente cromático, tiene un valor Abbe de 32, el Trivex: Futorex- Phoenix de 46, el Spectralite de 47 y en general, lentes de alto índice 36 (ver Tabla 2).

La aberración cromática debida al material del lente se puede presentar de dos formas: longitudinal y transversal. La longitudinal es la variación de posición de la imagen según la longitud de onda incidente y la transversal es la formación de imágenes de distinto tamaño para cada longitud de onda, ésta el usuario la percibirá como halos coloreados alrededor de la imagen, como contornos de arco iris en los objetos vistos a través de la periferia de los lentes y puede afectar la agudeza visual, ya que se percibe lateralmente como una indiscencia en todos los contornos (Arqués, 2000).

La Aberración Cromática Transversal (ACT) en los lentes oftálmicos esta medida en dioptrías prismáticas y está dado por:

$$ACT = \frac{P}{V}$$

Donde P es el efecto prismático en el punto visual oblicuo en el lente y V es el valor Abbe del material usado. Ahora, como $P = cF$ se puede escribir:

$$ACT = \frac{cF}{V}$$

La cantidad de ACT producida por un lente oftálmico depende de tres factores:

1. El poder del lente (F en dioptrías D).
2. La distancia desde el centro óptico hasta el punto visual oblicuo (c en cm).
3. El valor ABBE del material usado.

A través de diferentes estudios se ha llegado a la conclusión de que el diseño del lente tiene una incidencia pequeña en la inducción de ACT, como se puede observar en las tablas 3 y 4.

Según (Keirl, 2001) en la práctica, para minimizar los efectos de la ACT es:

- ◆ Usar materiales con valor Abbe alto.
- ◆ Aplicar la centración horizontal y vertical y ángulo pantoscópico adecuado.
- ◆ Usar el diseño adecuado del lente oftálmico.
- ◆ Ser cuidadosos en la selección de la montura en cuanto a forma y tamaño.
- ◆ Adaptar monturas con la menor distancia vértice posible. Pues a mayor distancia vértice, mayor distancia del centro óptico al punto visual para una rotación particular del ojo. Así que la adaptación de los lentes debe ser lo más cerca posible a los ojos, para mantener los puntos visuales cerca del centro óptico, lo cual minimiza los efectos de la ACT.

TABLA 1. VALORES DE LONGITUD DE ONDA CON RESPECTO A LAS LÍNEAS ESPECTRALES.

DESIGNACIÓN	λ (nm)	FUENTE
C	656,3 (rojo)	H
D ₁	589,6 (amarillo)	Na
D	589,3 (centro del doblete)	Na
D ₂	589,0 (amarillo)	Na
D ₃ o d	587,6 (amarillo)	He
e	546,07 (verde)	Hg
B ₁	518,4 (verde)	Mg
B ₂	517,3 (verde)	Mg
C	495,8 (verde)	Fe
F	486,1 (azul)	H
F'	434,0 (violeta)	H
G	422,8 (violeta)	Ca
K	393,4 (violeta)	Ca

TABLA 2. PROPIEDADES ÓPTICAS DE ALGUNOS MATERIALES DE LENTES OFTÁLMICOS.

TIPO	N _a	N° Abbe	DENSIDAD (gr/cm ³)
Orgánico índice bajo	1,498	58	1,32
Orgánico índice medio	1,53	48	1,30
Orgánico índice alto	1,6	36	1,34
Policarbonato	1,585	32	1,20
Trivex (Phoenix)	1,53	46	1,11

TABLA 3. VALORES DE ACT PARA TRES MATERIALES. LA ROTACIÓN OCULAR ES DE 30° Y LA DISTANCIA DE ADAPTACIÓN ES 27MM. LA FORMA DEL LENTE EN CADA CASO ESTUVO CERCA DEL MÍNIMO ERROR TANGENCIAL DE DISEÑO.

PODER DEL LENTE	Abbe= 60	Abbe=40	Abbe=30
-4,00 D	0,11▲	0,16▲	0,22▲
-6,00 D	0,17▲	0,25▲	0,33▲
-8,00 D	0,22▲	0,34▲	0,45 ² ▲
-10,00 D	0,29▲	0,43▲	0,58 ² ▲
-12,00 D	0,35▲	0,53▲	0,70▲

TABLA 4. VALORES DE ACT PARA TRES MATERIALES. LA ROTACIÓN OCULAR ES DE 30° Y LA DISTANCIA DE ADAPTACIÓN ES 27MM. LA FORMA DEL LENTE ES PLANO-CÓNCAVA.

PODER DEL LENTE	Abbe= 60	Abbe = 40	Abbe = 30
- 4.00 D	0.13▲	0.19▲	0.25▲
- 6.00 D	0.19▲	0.28▲	0.38▲
- 8.00 D	0.24▲	0.38▲	0.51▲
- 10.00 D	0.30▲	0.47▲	0.63▲
- 12.00 D	0.36▲	0.56▲	0.76▲

BIBLIOGRAFÍA

- Acosta, O. "Tópicos sobre Óptica Oftálmica". *Franja Visual* 6 22 (1995).
- Arques, J. *Tecnología Óptica* Barcelona: Alfaomega UPC, 2000.
- Born, M. y Wolf, E. *Principles of optics: electromagnetic theory of propagation, interference and diffraction of light* (8° ed.). Oxford: Pergamon Press, 1980.
- Bruneni, J. "La revolución del alto índice". *Franja Visual* 14 (1993).
- Fernández, C. y Martínez, B. *Eficiencia y confort de los lentes de alto índice*. Tesis de grado. ULS. Facultad de Optometría, 1992.
- Hecht, E. y Zajac, A. *Óptica*. EE.UU.: Addison-Wesley Iberoamérica, 1986.
- Jenkins, F. y White, H. *Fundamentals of optics* (3° ed.) New York: Mc Graw-Hill, 1957.
- Jalie, M. "Los materiales de índice muy alto". *Universo Visual*, 2003.
- Keirl, A. "Chromatism". *The optical principles underpinning chromatic aberration and its significance in the study of ophthalmic lens materials*. Dispensing Optics (2000 - 2001).
- Plata, J. *Óptica Oftálmica aplicada*, 2000.
- Sears, F. *Fundamentos de física óptica*. Aguilar, 1971.
- Scholnicov, B. *Elementos de óptica oftálmica*. Novalent, 1979.
- Troy, F. y Grosvenor, T. *Clinical Optics* (2° ed.). Butterworth- Heinemann, 1996.
- Wakefield, K. *Bennet's ophthalmic prescription work* (Fourth edition), 2000.