

Perspectiva óptica del material de policarbonato

JP Wei, Ph. D.

Noviembre de 2011

VISION-EASE LENS
W O R L D W I D E

Introducción

Entre los materiales desarrollados para anteojos, el policarbonato tiene varias propiedades únicas y ofrece beneficios reales a los usuarios de anteojos. Las lentes de policarbonato no son solo cosméticamente más delgadas, ligeras y con resistencia superior al impacto, sino que también proveen nítida claridad óptica para la visión central y periférica.

Es bien sabido que al aumentar el índice de refracción, también aumenta la dispersión. Dicho de otra manera, a mayor índice de refracción, menor es el número de Abbe. Un aumento en la dispersión provocará un aumento en la aberración cromática. Por lo tanto, una de las inquietudes al usar materiales para lentes, como el policarbonato, es la siguiente: ¿tendrá la aberración cromática un efecto negativo en la adaptación del paciente?

MATERIAL DE LALENTE	CR39	TRIVEX	ÍNDICE MEDIO	POLICARBONATO	ÍNDICE 1.67	ÍNDICE 1.70
ÍNDICE DE REFRACCIÓN	1.499	1.529	1.558	1.586	1.661	1.700
NÚMEROS DE ABBE	58	45	37	30	32	36

El índice de refracción de un material por lo general se abrevia como “n”. Con excepción del aire, que tiene un índice de refracción de aproximadamente 1, el índice de refracción de la mayoría de las sustancias es mayor que 1 ($n > 1$). El agua, por ejemplo, tiene un índice de refracción de 1.333. Cuanto mayor sea el índice de refracción del material de una lente, más lento viajará la luz por él.

Aunque se sabe que los materiales de alto índice tendrán mayor aberración cromática que las lentes de CR-39 o bajo índice de refracción, no se ha cuantificado la pérdida de agudeza visual resultante de la aberración cromática.

El propósito de este artículo es revisar las propiedades ópticas del material de policarbonato, sus ventajas con respecto a otros materiales para lentes, y el impacto de la aberración cromática causada por el número Abbe relativamente bajo del material en la visión y su importancia clínica.

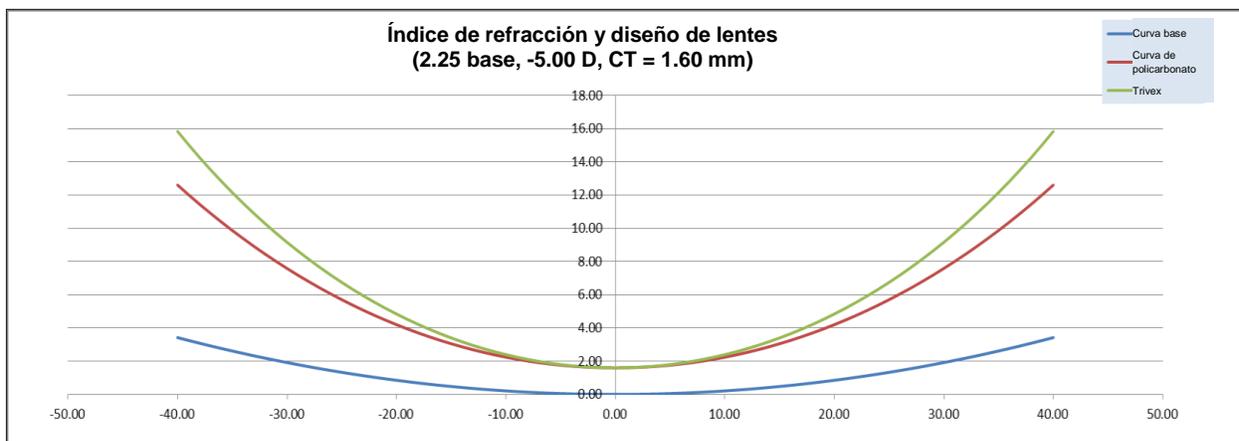
Índice de refracción y diseño de lentes

El índice de refracción de un material es simplemente el cociente de la velocidad de la luz que pasa por el vacío y la velocidad de la luz que pasa por un material dado. Es bien sabido que la velocidad de un rayo de luz que pasa por un material varía según la longitud de onda de la luz. Por lo tanto, el índice de refracción de un material variará según la longitud de onda de la luz. Por esta razón, al especificar el índice de refracción es necesario especificar también la longitud de onda de la luz que se utiliza. Por lo

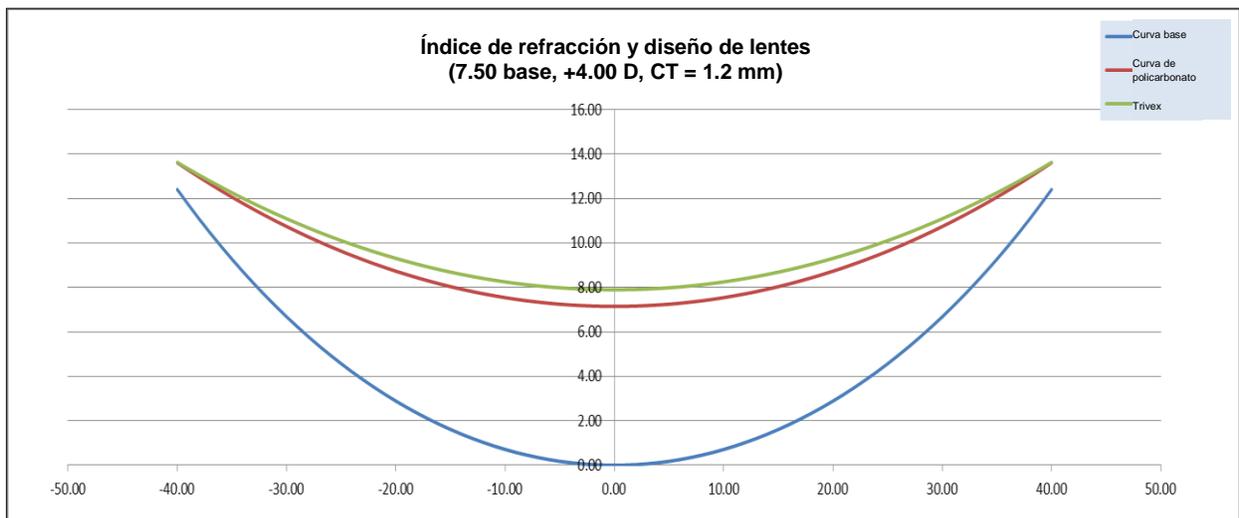
tanto, el índice de refracción es la medida de la desviación de un rayo de luz al pasar de un medio a otro.

Al igual que las lentes de policarbonato, las lentes hechas de Trivex son delgadas, ligeras y más resistentes al impacto que el plástico normal. Sin embargo, el policarbonato tiene mayor índice de refracción que Trivex (1.586 contra 1.529) y, en consecuencia, las lentes de policarbonato son aproximadamente un 10 por ciento más delgadas que las lentes de Trivex. La ventaja para el usuario es que las lentes son menos conspicuas.

Para una potencia de lente y la misma curva base, el material de lente con mayor índice de refracción tendrá una curva posterior más plana y, por lo tanto, un grosor de borde (ET) mucho menor para lentes negativas, con un grosor central (CT) mínimo.



En las lentes positivas, para lograr la misma potencia de lente con la misma curva base delantera, el material con mayor índice de refracción tiene una curva trasera más pronunciada. Con el mismo ET mínimo, la lente tendrá un CT mucho más delgado, en especial para lentes muy positivos.



Índice de refracción y dispersión cromática

La dispersión es la diferencia en el índice de refracción a distintas longitudes de onda.

El índice de refracción de un material también varía ligeramente en función de la longitud de onda. Cada color de la luz tendrá un índice de refracción ligeramente diferente en el mismo material de lente. Este fenómeno es responsable de la dispersión cromática, o la separación de la luz blanca en sus colores componentes que ocurre en prismas y lentes. La luz azul, que tiene mayor índice de refracción que la luz roja, se refracta (o desvía) más que la luz roja al pasar por una lente o un prisma.

La dispersión cromática se debe a que los colores de luz con longitud de onda más corta, como el azul, viajan más lento por la mayoría de los materiales transparentes que los colores con mayor longitud de onda, como el rojo.

La dispersión se define como:

$$\text{Dispersión relativa} = (\eta_F - \eta_C) / (\eta_d - 1) \quad \dots 1)$$

En la ecuación 1, η_F es el índice de refracción en la línea F de Fraunhofer (486.13 nm), η_C es el índice de refracción en la línea C de Fraunhofer (656.27 nm), y η_d es el índice de refracción en la línea del helio (587.6 nm). Se utilizan estas longitudes de onda en particular porque abarcan más del 90% de la eficiencia fotópica del ojo humano.

La constringencia de un material es el recíproco (inverso) de la dispersión relativa. La constringencia también se conoce como número de Abbe y se define como:

$$\text{Número de Abbe} = v_d = (\eta_d - 1) / (\eta_F - \eta_C) \quad \dots 2)$$

El grado en que el material de una lente dispersa la luz se describe con una medida de su eficiencia de refracción o, más comúnmente, su número de Abbe, nombrado así en honor de Ernst Abbe.

En la siguiente tabla se presentan el índice de refracción y el número de Abbe de algunos de los materiales más comunes de las lentes.

Índice de refracción para distintos materiales

Material	Índice de refracción	Abbe
CR-39	1.498	57.8
Vidrio Crown	1.523	58.5
Trivex	1.529	47.0
Plástico 1.56	1.555	36.0
Polycarbonato	1.586	30.0
Plástico 1.60	1.594	37.0
Plástico 1.66	1.660	32.0
Plástico 1.70	1.70	36.0
Vidrio 1.70	1.701	32.0
Vidrio 1.80	1.805	25.4

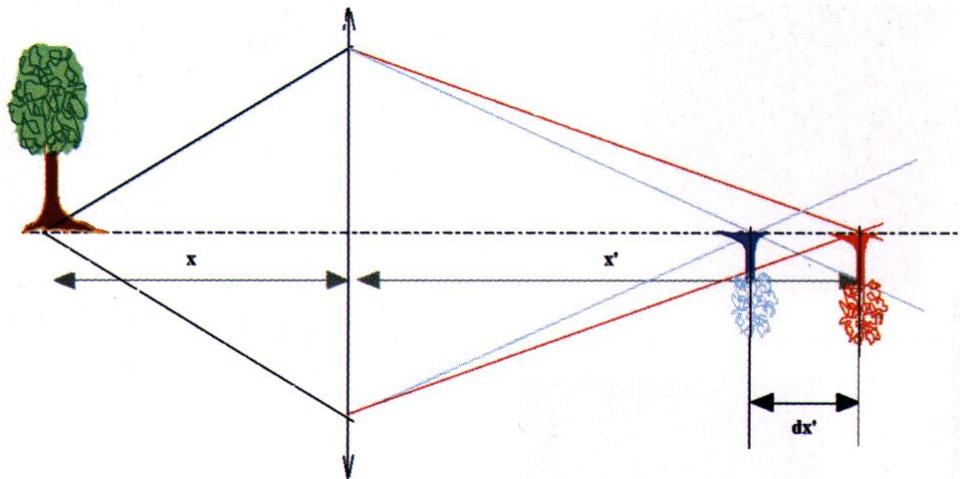
Aberración cromática

Idealmente, la lente de unos anteojos debe dirigir todos los colores componentes de la luz blanca hacia un punto focal a la distancia focal de la lente. Esto significa que la lente refractará todos los colores de la luz blanca de igual manera, para que se intersequen en el mismo lugar (o foco).

Hay dos tipos de aberración cromática: aberración cromática longitudinal (axial) (LCA) y aberración cromática transversal (TCA).

1. Aberración cromática longitudinal (LCA)

La LCA ocurre durante la visualización por el eje óptico de la lente. La LCA crea imágenes múltiples a lo largo del eje óptico, como se ilustra en la siguiente figura.



Aberración cromática longitudinal

Dado que el índice de refracción varía según la longitud de onda, la distancia focal de una lente variará para cada longitud de onda de la luz. Como puede verse en la figura anterior, la imagen azul está enfocada a la distancia más corta, mientras que la imagen roja está enfocada a la distancia más larga.

La aberración cromática longitudinal es una medida de la diferencia en el enfoque de los extremos azul y rojo del espectro de colores, por causa de la dispersión cromática.

La LCA puede cuantificarse como:

$$LCA = F / v_d \quad \dots 3)$$

donde:

F es la potencia de la lente, en dioptrías

v_d es el número de Abbe.

A partir de esta ecuación, es aparente que no hay LCA para una lente de potencia plana, y que la LCA aumenta en proporción directa a la potencia de la lente.

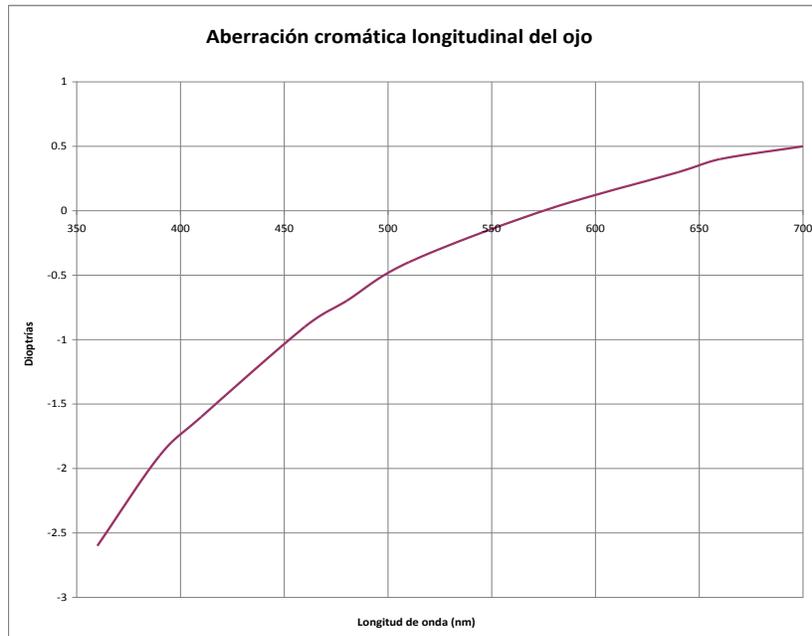
En la siguiente tabla se presentan los valores de LCA para distintas potencias de lentes (potencias positivas o negativas) y algunos materiales de lentes.

Aberración cromática longitudinal (D) contra potencia de lente (D)

Potencia de la lente (D)	CR-39	Trivex	Policarbonato	Índice 1.60	Índice 1.70
20.00	0.350	0.426	0.670	0.540	0.556
15.00	0.260	0.319	0.500	0.410	0.417
10.00	0.170	0.213	0.330	0.270	0.278
5.00	0.090	0.106	0.170	0.140	0.139
4.00	0.070	0.085	0.130	0.110	0.111
3.00	0.050	0.064	0.100	0.080	0.083
2.00	0.030	0.043	0.070	0.050	0.056
1.00	0.020	0.021	0.030	0.030	0.028

El ojo humano tiene una cantidad significativa de LCA. Gullstrand estimó que el número de Abbe del ojo es de aproximadamente 43 a 45. Varios estudios han determinado que la LCA del ojo es superior a 2.50 D. Además, la LCA del ojo disminuye con la edad, particularmente en el ancho de banda de 440 a 560 nm. Se cree que esto posiblemente se deba al amarilleo del cristalino.

En el gráfico a continuación se muestra la aberración cromática longitudinal espectral del ojo, determinada en el estudio de Lewis, Katz y Oehrlein.

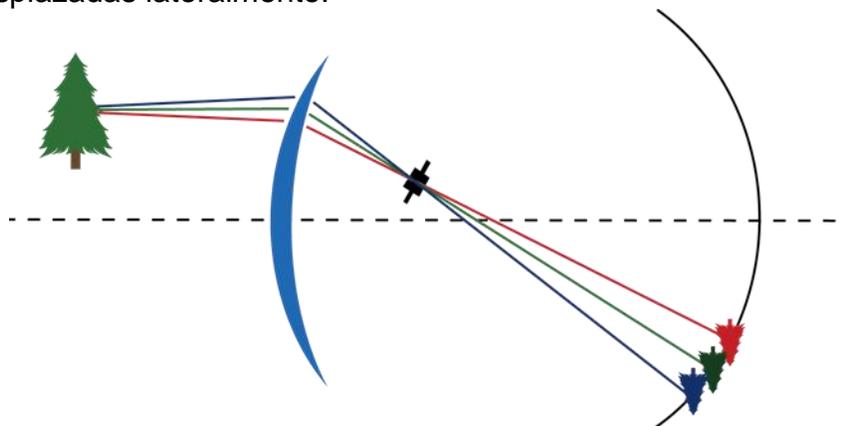


La conclusión es que la aberración cromática longitudinal de la lente no es significativa porque:

- es pequeña en comparación con la del ojo humano. Por ejemplo, una lente de policarbonato de 20.00 dioptrías tiene 0.67 D de LCA, en comparación con 2.50 D para el ojo.
- la curva de respuesta visual está centrada en el amarillo y desciende rápidamente hacia el rojo y el azul.

2. Aberración cromática transversal

El segundo tipo de aberración cromática es la aberración cromática transversal (TCA). Es el equivalente fuera de eje de la aberración cromática longitudinal y crea múltiples imágenes desplazadas lateralmente.



Aberración cromática transversal

La siguiente ecuación expresa la TCA como una diferencia en el efecto prismático:

$$\text{TCA} = (\text{potencia de la lente} * \text{descentración}) / \text{número de Abbe} \quad \dots 4)$$

Por lo tanto, la TCA depende únicamente de la potencia de la lente, la excentricidad de la mirada y la dispersión del material de la lente.

3. Visión periférica

Se han realizado muchos estudios de los movimientos oculares desde el punto de fijación principal. Los estudios clínicos indican que el 80% de los movimientos del ojo son a menos de 20° del punto de fijación, y el 100% están dentro de 30°. Más allá de los 30°, la persona girará la cabeza en lugar de mover los ojos.

La descentración como función del ángulo de mirada se determina mediante el trazado de rayos para diversas potencias de lentes con distintos ángulos de mirada. Aunque la descentración como función del ángulo de mirada varía según la potencia de la lente, en general, una descentración de un ángulo de mirada de 20° es de aproximadamente 10 mm, y la descentración para un ángulo de mirada de 30° es de aproximadamente 15 mm.

Con la ecuación 4, puede calcularse la aberración cromática transversal para diversos materiales y potencias de lentes. En la tabla a continuación se presenta la TCA en dioptrías de prisma para diversos materiales.

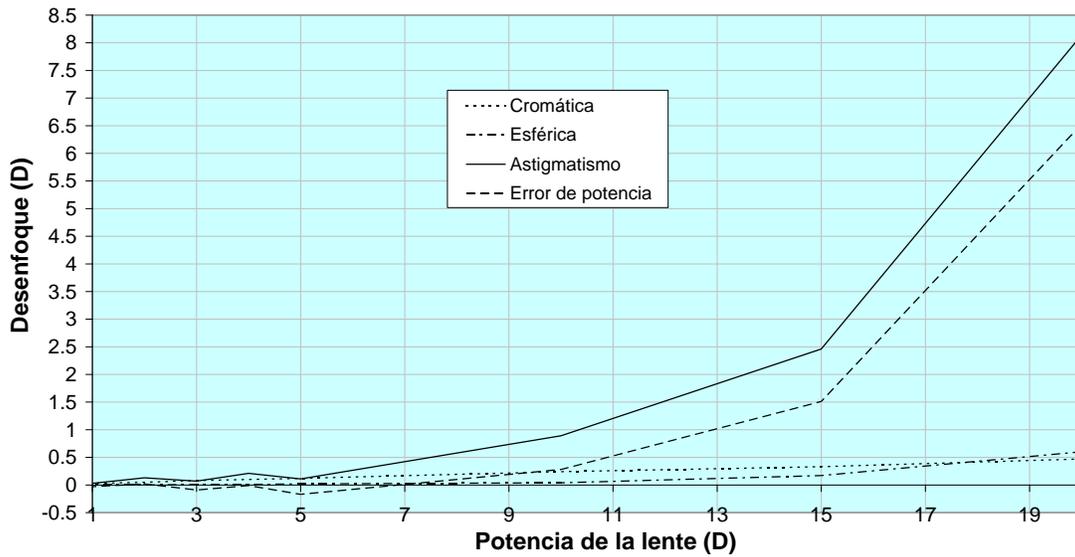
TCA (Δ) contra potencia de la lente

(Descentración de 15 mm, ángulo de mirada de 30°)

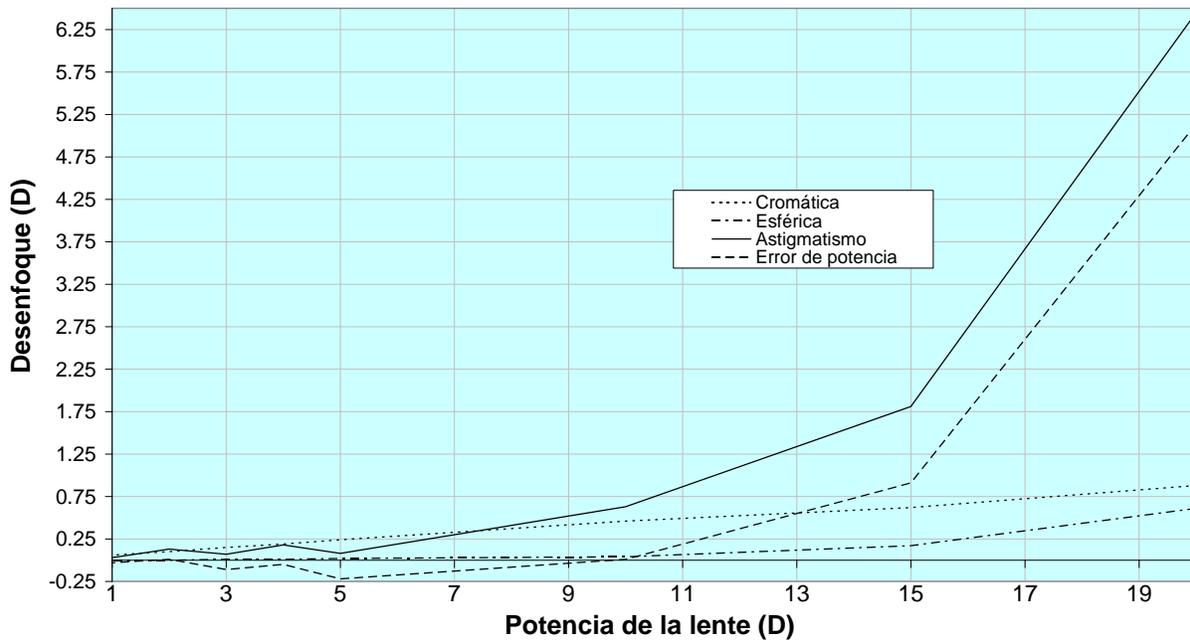
Potencia	CR-39	Trivex	Policarbonato	Índice 1.60
20.00	0.520	0.638	1.000	0.810
15.00	0.390	0.479	0.750	0.610
10.00	0.260	0.319	0.500	0.410
5.00	0.130	0.160	0.250	0.200
1.00	0.030	0.032	0.050	0.040

La pérdida de agudeza debida a la TCA también puede compararse con otras aberraciones. En los dos gráficos siguientes, uno para CR-39 y uno para policarbonato, se compara la TCA con la aberración esférica, el astigmatismo marginal y el error de potencia. Cada uno de estos errores se calculó con una descentración de 15 mm (ángulo de mirada de 30°) con curvas frontales esféricas.

Aberraciones de CR-39



Aberraciones del policarbonato

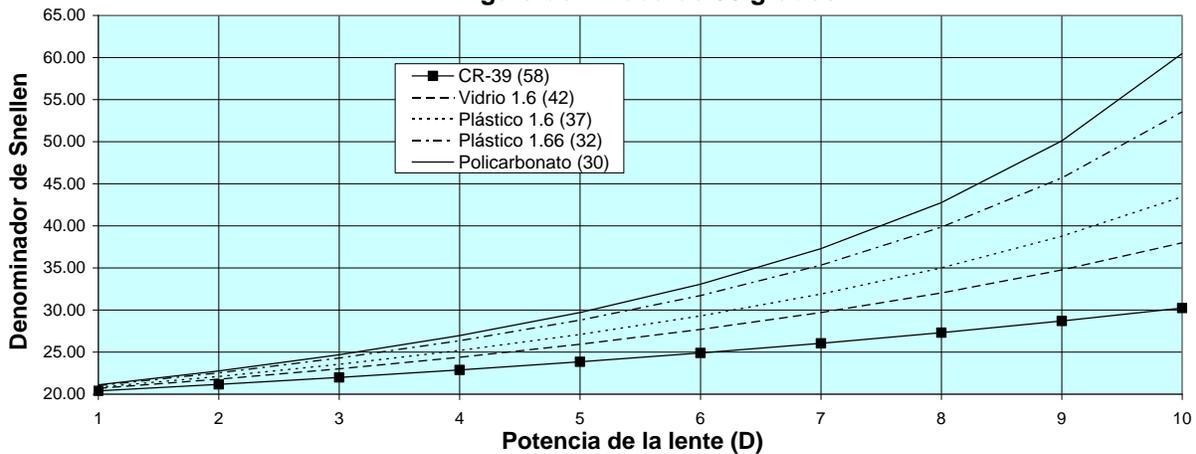


Es evidente que la aberración cromática transversal es un factor menor del desenfoque. A potencias bajas, la TCA es similar a otras aberraciones. A potencias mayores, incluso con materiales de tan alta dispersión como el policarbonato, el astigmatismo marginal y el error de potencia contribuyen mucho más al desenfoque.

Estudios clínicos sobre la aberración cromática transversal

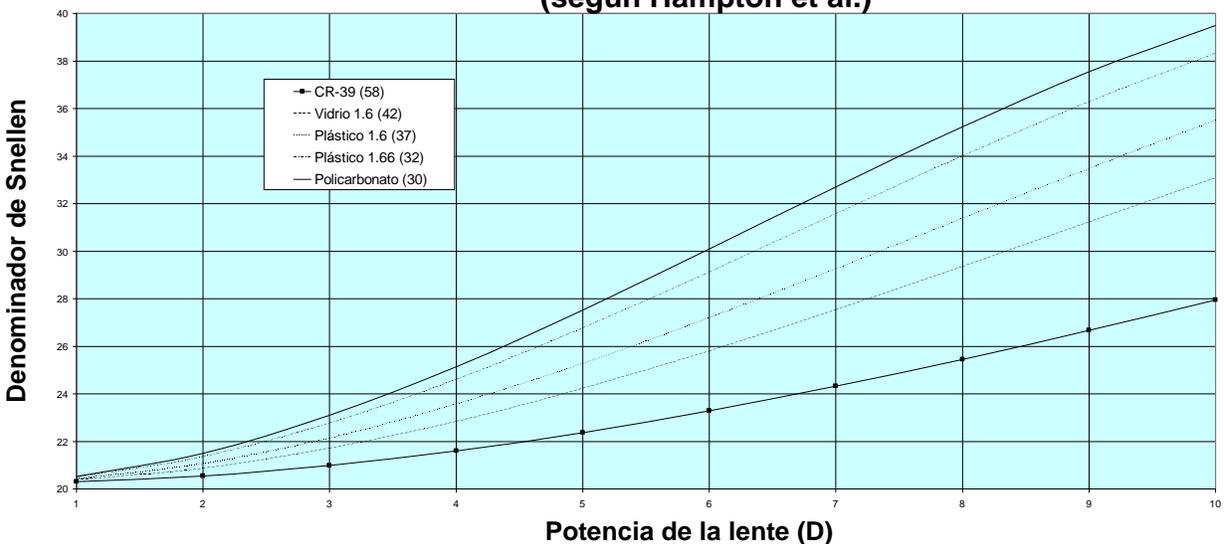
La aberración cromática transversal se manifiesta como la aparición de bordes de colores. Sin embargo, se ha determinado que la percepción de bordes de colores no ocurre de manera simultánea con la pérdida de agudeza visual.

Pérdida de agudeza (según Meslin) Ángulo de mirada de 30 grados



Se observa que, teniendo en cuenta la variación en los datos e ilustrado con las barras de errores, el policarbonato y CR-39 siguen la misma pérdida de agudeza. La relación encontrada por Hampton et al. puede extenderse a otros materiales, como se muestra en el siguiente gráfico.

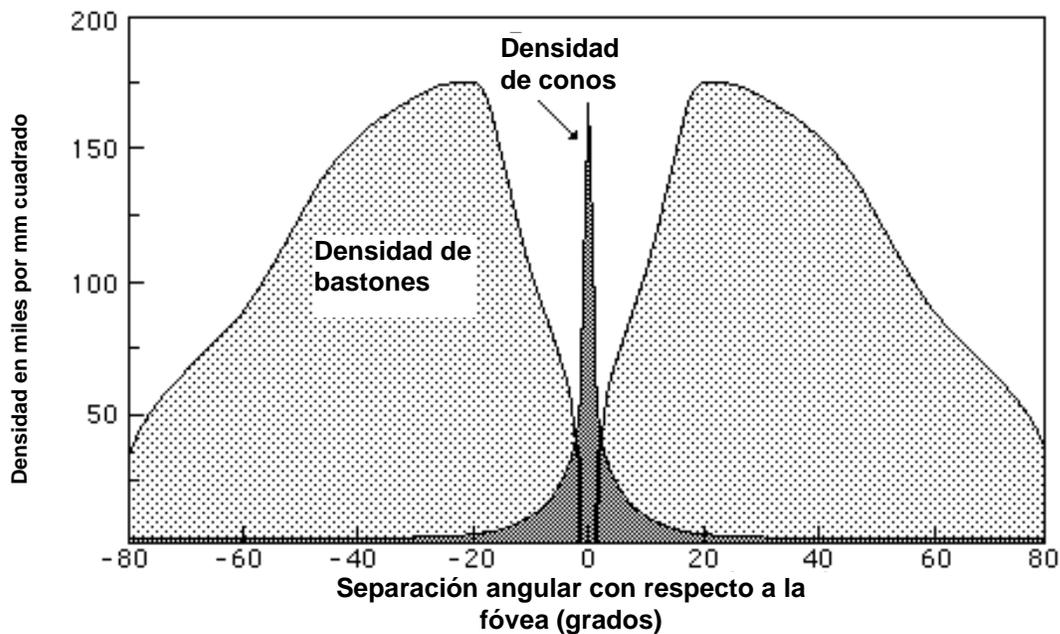
Agudeza visual a un ángulo de mirada de 30 grados (según Hampton et al.)



Los datos clínicos han mostrado que no se presenta una pérdida de agudeza de 1 línea (20/25) con un ángulo de mirada de 30° para el policarbonato hasta que la potencia de la lente llega a 4.00 D. Con un ángulo de mirada de 20°, no se presenta una pérdida de agudeza de 1 línea para el policarbonato hasta que la potencia de la lente es cercana a 6.00 D. Como referencia, el 96.9% de todas las graduaciones son de -6.00 D a +5.00 D, y el 91.6% son de ± 4.00 D.

Anatómicamente, la retina contiene dos tipos de fotorreceptores: bastones y conos. Los bastones son más numerosos, cerca de 120 millones, y más sensibles que los conos. Sin embargo, no son sensibles al color. Los 6 a 7 millones de conos proveen la sensibilidad al color del ojo y están más concentrados en la fóvea central.

Tanto la visión del color y la agudeza visual son mediadas por los conos. A un ángulo de mirada de 20°, la sensibilidad de discriminación de colores es muy baja. Los bordes de colores causados por la TCA no son perceptiblemente notables. La agudeza visual está determinada principalmente por el tamaño y la densidad de los conos. Dado que los conos están concentrados en la fóvea, la agudeza visual disminuye rápidamente a medida que aumenta el tamaño de los conos, y la densidad se reduce de manera dramática de la fóvea central hacia la periferia. Por lo tanto, el impacto de la TCA en la visión periférica es negociable.



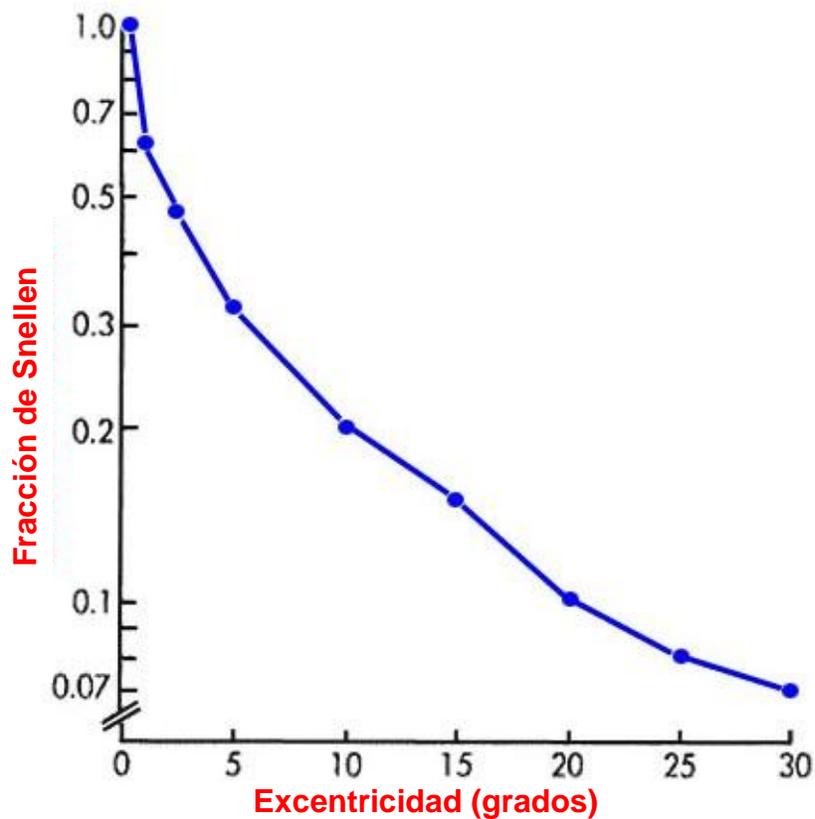


Figura 19. Los efectos de la excentricidad en la agudeza visual (expresada en notación decimal). Datos de Westheimer, de Westheimer G., *Visual Acuity*. Capítulo 17. En: Moses, R. A. y Hart, W. M. (ed.) *Adler's Physiology of the eye, Clinical Application*. St. Louis: The C. V. Mosby Company, 1987.

La TCA es una aberración fuera de eje y, por lo tanto, se minimizará con una colocación exacta del centro óptico con respecto a la línea visual. Tal como ya se señaló, las lentes con menor distancia de vértice córneo tendrán menos descentración para el mismo ángulo de mirada. Las lentes deberán ajustarse lo más cerca que resulte práctico, teniendo en cuenta las restricciones anatómicas del usuario.

Resumen

La revisión del efecto de la aberración cromática en la agudeza visual puede resumirse como sigue:

1. La aberración cromática longitudinal causada por la lente no es motivo de preocupación, ya que es menos de una cuarta parte de la causada por el ojo humano.

2. La aberración cromática transversal medida en todos los estudios clínicos muestra que, incluso con los materiales de mayor dispersión (policarbonato y plástico 1.66), la pérdida de agudeza es menos de 1 línea (20/25) a un ángulo de mirada de 30° únicamente para potencias de lentes de ± 4.00 D. Esta gama de potencia abarca casi el 92% de todas las graduaciones.
3. Para potencias superiores a ± 4.00 D, se perderá 1 línea de agudeza con los materiales con dispersión. Sin embargo, la pérdida de agudeza como consecuencia de la aberración cromática es típicamente menor que la causada por otras aberraciones de las lentes.
4. La pérdida de agudeza como consecuencia de la aberración cromática es pequeña en comparación con otras aberraciones fuera de eje.

Para más información sobre productos de Vision-Ease Lens o aprender más sobre la ciencia de óptica, visita a nuestra página web al: <http://esp.vision-ease.com>

VISION-EASE LENS
WORLDWIDE