

Óptica fisiológica

M.^a Cinta Puell

UCM

EDITORIAL
COMPLUTENSE

Queda rigurosamente prohibida sin la autorización escrita de los titulares del Copyright, bajo las sanciones establecidas en las leyes, la reproducción total o parcial de esta obra por cualquier medio o procedimiento, comprendidos la reprografía y el tratamiento informático, y la distribución de ejemplares de ella mediante alquiler o préstamo público.

© 2006 by M.^a Cinta Puell Marín

© 2006 by Editorial Complutense, S. A.

Donoso Cortés, 63 – 4. planta (28015) Madrid

Tels.: 91 394 64 60/1 Fax: 91 394 64 58

e-mail: ecsa@rect.ucm.es

www.editorialcomplutense.com

Ilustraciones a cargo de Margarita Susín Brabo

Primera edición: diciembre 2006

ISBN: 978-84-7491-829-8

Óptica Fisiológica: El ojo como sistema óptico

Dra M^a Cinta Puell Marín

Prof. del Departamento de Óptica

1	EL SISTEMA ÓPTICO OCULAR.....	9
1.1	ESTRUCTURA ANATÓMICA DEL OJO HUMANO.....	9
1.2	ESTRUCTURA ÓPTICA Y FORMACIÓN DE LA IMAGEN.....	11
1.2.1	Potencia equivalente y distancias focales	12
1.3	LA CÓRNEA.....	13
1.3.1	Forma de la superficie anterior.....	16
1.4	LA CÁMARA ANTERIOR.....	18
1.5	EL IRIS Y LA PUPILA	18
1.6	LALENTE DEL CRISTALINO	19
1.6.1	Acomodación	23
1.7	LA RETINA	24
1.8	EL OJO ESQUEMÁTICO PARAXIAL	24
1.8.1	Potencia equivalente y puntos cardinales	25
1.8.2	Las pupilas de entrada y salida.....	26
1.9	LOS EJES DEL OJO	28
1.10	EL CAMPO VISUAL	31
1.11	EL OJO REDUCIDO	33
1.12	LA IMAGEN RETINIANA: FORMACIÓN Y TAMAÑO	36
1.12.1	Ojo enfocado al infinito	41
2	LAS AMETROPÍAS ESFÉRICAS.....	43
2.1	CLASIFICACIÓN DE LAS AMETROPÍAS	44
2.2	LA MIOPIA.....	44
2.2.1	El punto remoto de visión nítida	45
2.3	LA HIPERMETROPÍA.....	46
2.3.1	El punto remoto de visión nítida	46
2.4	REFRACCIÓN OCULAR (R) O GRADO DE AMETROPÍA	47

2.5	CAUSAS DE LAS AMETROPIAS ESFERICAS.....	50
2.5.1	La hipermetropía	51
2.5.2	La miopía	54
2.6	IMAGENES RETINIANAS BORROSAS	57
2.6.1	Objeto puntual: diámetro del círculo de difusión.....	57
2.6.2	Agujero estenopeico.....	60
2.6.3	Objeto extenso.....	62
2.6.4	Razón de borrosidad.....	67
3	COMPENSACION OPTICA DE LAS AMETROPIAS	
ESFERICAS.....		69
3.1	FUNDAMENTO DE LA COMPENSACION EN VISION LEJANA.....	70
3.2	POTENCIA DE LA LENTE COMPENSADORA. REFRACCION	
OFTALMICA.....		71
3.3	COMPENSACION DE LA AMETROPIA CON UNA LENTE REAL.....	75
3.4	EFFECTO DEL CAMBIO DE LA DISTANCIA DE VERTICE.....	76
3.5	LA IMAGEN RETINIANA EN LAS AMETROPIAS COMPENSADAS	
CON LENTES DELGADAS		79
3.6	AUMENTO DE LA LENTE OFTALMICA.....	84
3.7	AUMENTO RELATIVO DE LA LENTE OFTALMICA	90
4	ASTIGMATISMO OCULAR.....	93
4.1	CAUSAS DEL ASTIGMATISMO.....	94
4.2	FORMACION DE LA IMAGEN EN EL OJO ASTIGMATICO	95
4.3	CLASIFICACION DEL ASTIGMATISMO OCULAR	103
4.3.1	Astigmatismo simple.....	104
4.3.2	Astigmatismo compuesto.....	105
4.3.3	Astigmatismo mixto.....	105
4.4	VISION DEL OJO ASTIGMATATA SIN COMPENSAR.....	105
4.4.1	Aspecto de la imagen retiniana de objetos extensos en los diferentes tipos de astigmatismo.....	107

4.4.2	Efecto de la acomodación en la visión del ojo astigmático sin compensar	110
4.5	TAMAÑO DE LA IMAGEN RETINIANA DE OBJETOS EXTENSOS EN EL OJO ASTIGMÁTICO SIN COMPENSAR.....	115
5	COMPENSACIÓN ÓPTICA DEL ASTIGMATISMO.....	119
5.1	LENTES ASTIGMÁTICAS.....	119
5.2	COMPENSACIÓN EN LOS DIFERENTES TIPOS DE ASTIGMATISMO	121
5.3	POTENCIA DE LA LENTE OFTÁLMICA A UNA DETERMINADA DISTANCIA DE VÉRTICE	125
5.4	TAMAÑO DE LA IMAGEN RETINIANA EN EL OJO ASTIGMÁTICO COMPENSADO	128
6	ACOMODACIÓN Y VISIÓN PRÓXIMA.....	133
6.1	MECANISMO DE LA ACOMODACIÓN	134
6.1.1	Teorías de la acomodación.....	135
6.2	MODIFICACIONES DEL OJO DURANTE LA ACOMODACIÓN.....	138
6.3	RECORRIDO Y AMPLITUD DE LA ACOMODACIÓN.....	140
6.3.1	Influencia de la refracción ocular en la acomodación	146
6.3.2	Recorrido de acomodación con lentes oftálmicas	148
6.4	ACOMODACIÓN OFTÁLMICA Y ACOMODACIÓN OCULAR	153
6.5	TAMAÑO DE LA IMAGEN RETINIANA NÍTIDA DE UN OBJETO PRÓXIMO EN LAS AMETROPIÁS COMPENSADAS	159
6.6	ESTÍMULOS Y COMPONENTES FUNCIONALES DE LA ACOMODACIÓN.....	161
6.6.1	Fenómenos asociados con la acomodación.....	163
6.6.2	Acomodación física y fisiológica	164
6.7	PROFUNDIDAD DE FOCO Y PROFUNDIDAD DE CAMPO.....	164
7	PRESBICIA.....	173

7.1	VARIACIÓN DE LA AMPLITUD DE ACOMODACIÓN CON LA EDAD	173
7.2	EVOLUCIÓN DE LA PRESBICIA CON LA REFRACCIÓN	175
7.3	ADICIÓN DE CERCA Y CÁLCULO DE LA ACOMODACIÓN OCULAR	176
7.4	CAUSAS DE LA DISMINUCIÓN DE LA AMPLITUD DE ACOMODACIÓN CON LA EDAD.....	179
8	MOTILIDAD OCULAR.....	183
8.1	DIRECCIONES DE LOS MOVIMIENTOS OCULARES.....	183
8.1.1	Rotaciones monoculares: posiciones básicas de los ojos, centro de rotación, planos y ejes de referencia, ducciones.....	183
8.1.2	Movimientos binoculares	186
8.2	LOS MÚSCULOS EXTRAOCULARES.....	188
8.3	ACCIÓN DE LOS MÚSCULOS EXTRAOCULARES	190
8.3.1	Mecánica muscular	190
8.3.2	Acciones monoculares principal y secundaria.....	193
8.4	ACCIONES MUSCULARES EN LOS MOVIMIENTOS BINOCULARES. CAMPOS DE ACCIÓN DE LOS MÚSCULOS O POSICIONES DIAGNÓSTICAS	202
8.4.1	Músculos sinergistas y antagonistas	205
8.4.2	Leyes de la inervación motora: ley de Sherrington y ley de Hering	206
9	VISIÓN BINOCULAR Y ESTEREOPSIS	209
9.1	CONDICIONES DE LA VISIÓN BINOCULAR	209
9.1.1	Campo visual común	210
9.1.2	Campo de fijación y coordinación binocular de los movimientos oculares.....	211
9.1.3	Fusión.....	212
9.2	PROYECCIÓN MONOCULAR.....	213
9.3	CORRESPONDENCIA RETINIANA.....	215

9.4	OJO CÍCLOPE	216
9.5	DIPLOPIA FISIOLÓGICA	218
9.5.1	Diplopia fisiológica homónima y heterónima	219
9.5.2	Diplopia patológica debida a un estrabismo.....	221
9.6	LOCALIZACIÓN SUBJETIVA DE LOS OBJETOS	222
9.7	HORÓPTERO. DETERMINACIÓN DEL HOROPTERO	
	LONGITUDINAL	224
9.8	ÁREA FUSIONAL DE PANUM Y PUNTOS DISPARES.....	227
9.9	DISPARIDAD DE FIJACIÓN	230
9.10	FUSIÓN, RIVALIDAD Y SUPRESIÓN.....	232
9.11	PERCEPCIÓN BINOCULAR DE PROFUNDIDAD: VISIÓN	
	ESTEREOSCÓPICA	234
9.11.1	Disparidad binocular	235
9.11.2	Agudeza estereoscópica.....	238
9.11.3	Visión estereoscópica de puntos al azar	242
10	LA CONVERGENCIA.....	245
10.1	CONCEPTO DE CONVERGENCIA.....	245
10.2	PUNTO PRÓXIMO DE CONVERGENCIA	247
10.3	CÁLCULO DEL ÁNGULO DE CONVERGENCIA. UNIDADES	247
10.4	CONVERGENCIA, ACOMODACIÓN Y ERROR REFRACTIVO	251
10.4.1	Emetropía.....	252
10.4.2	Ametropía sin compensar	253
10.4.3	Emétrope con compensación de cerca	254
10.4.4	Ametropía compensada: convergencia a través de la lente oftálmica	254
10.4.5	Ametropía compensada con lentes de contacto	256
10.5	RELACIONES ENTRE CONVERGENCIA Y ACOMODACIÓN.....	258
10.5.1	Convergencia acomodativa, próxima y fusional.....	258
11	EL OJO ESQUEMÁTICO PARAXIAL	263

11.1	EL OJO ESQUEMÁTICO	263
11.2	CÁLCULO DE LOS PUNTOS CARDINALES	265
11.2.1	Córnea	265
11.2.2	Cristalino	268
11.2.3	El ojo completo.....	270
11.3	EL OJO ESQUEMÁTICO ACOMODADO.....	273
11.4	RELACIONES PARAXIALES APLICADAS AL OJO ESQUEMÁTICO ...	275
11.5	PUPILAS DE ENTRADA Y SALIDA EN EL OJO ESQUEMÁTICO DE TRES SUPERFICIES	277
11.6	TAMAÑO DE LAS IMÁGENES RETINIANAS BORROSAS EN EL OJO ESQUEMÁTICO	280
11.7	DEFECTOS ÓPTICOS DE LA IMAGEN RETINIANA	283
11.7.1	Aberración esférica ocular	284
11.7.2	Aberración cromática	287
11.7.3	Aberraciones periféricas.....	292
11.7.4	Descentrado.....	293
11.8	DIMENSIONES Y PROPIEDADES DE LAS IMÁGENES DE PURKINJE.	293
11.9	DISTRIBUCIÓN DE LOS COMPONENTES OCULARES Y DE LAS AMETROPÍAS.....	296
11.9.1	Coordinación de los componentes.....	298

1 EL SISTEMA ÓPTICO OCULAR

El ojo humano es un sistema óptico positivo o convergente que forma una imagen invertida del mundo externo sobre la capa sensible de la retina, situada al fondo del globo ocular. Este capítulo es un resumen general de la estructura óptica y formación de la imagen por el sistema óptico del ojo humano. Se estudian las propiedades básicas del ojo como formador de imágenes. En primer lugar se especifican las características de los componentes del sistema óptico ocular de forma secuencial y después del sistema en su totalidad, describiendo algunos modelos que esquematizan la complejidad óptica del ojo humano y que facilitan los cálculos. A continuación se explica la formación de la imagen asumiendo que los rayos formadores de la imagen se comportan como rayos paraxiales. Finalmente, se definen los distintos estados refractivos y como, debido a la coordinación que existe entre los diferentes componentes de la refracción ocular, el ojo en la mayoría de los casos alcanza la emetropía.

1.1 ESTRUCTURA ANATÓMICA DEL OJO HUMANO

La estructura del ojo humano se muestra en la *Figura 1.1*. En la parte anterior de la capa externa y a continuación de la esclera se diferencia la córnea, de mayor curvatura que el resto del globo ocular y a través de la cual entra la

luz. La cornea es transparente y aproximadamente esférica con un radio de curvatura de aproximadamente 8 mm. La esclera es un tejido fibroso denso, blanco y opaco que tiene una función principalmente protectora y es casi esférica con un radio de curvatura aproximado de 12 a 13 mm.

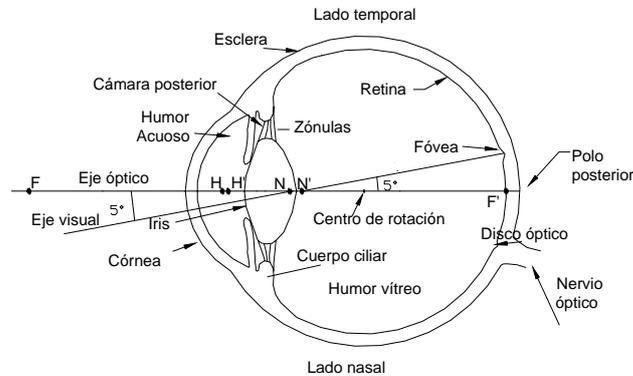


Figura 1.1. Sección horizontal del ojo derecho visto desde arriba. Los puntos cardinales (F, F', H, H', N y N') son los correspondientes al ojo relajado.

La capa media del ojo es la úvea en la que se diferencian el iris en la parte anterior, la coroides en la parte posterior, y el cuerpo ciliar en la parte intermedia. El iris tiene una importante función óptica al regular el tamaño de su apertura, el cuerpo ciliar es importante para el proceso de la acomodación, y tanto el cuerpo ciliar como la coroides intervienen en importantes procesos vegetativos.

La capa más interna del ojo es la retina, que es una extensión del sistema nervioso central y está conectada con el cerebro por el nervio óptico.

El interior del ojo está dividido en tres compartimentos:

- 1- La cámara anterior, entre la cornea y el iris, que contiene el humor acuoso.

- 2- La cámara posterior, entre el iris, el cuerpo ciliar y el cristalino, que contiene el humor acuoso.
- 3- La cámara vítrea, entre el cristalino y la retina, que contiene una masa gelatinosa transparente e incolora llamada humor vítreo o cuerpo vítreo.

Además, es de señalar que el ojo rota en su cavidad orbitaria gracias a la acción de seis músculos extrínsecos.

1.2 ESTRUCTURA ÓPTICA Y FORMACIÓN DE LA IMAGEN

En el ojo los principios de formación de la imagen son los mismos que los de un sistema óptico convencional. La luz entra en el ojo a través de la córnea, para ser enfocada en la retina después de la refracción en la córnea, el elemento refractivo de mayor potencia, y la lente del cristalino. La luz se refracta de forma muy acentuada en la superficie corneal anterior debido a que la parte esférica central tiene una curvatura muy acentuada y a que existe una gran diferencia entre los índices de refracción del aire (1) y de la córnea (1,376). Sin embargo, la refracción en la cara posterior de la córnea es muy poco significativa debido a que el índice refractivo de la sustancia corneal es prácticamente igual al del humor acuoso. A continuación, la luz se vuelve a refractar otra vez cuando alcanza la cara anterior y posterior del cristalino. En este caso, el índice de refracción de la sustancia del cristalino es significativamente más alto que el de los humores acuoso y vítreo, pero las diferencias en las interfases no son tan acusadas como la existente entre la córnea y el aire y por lo tanto la potencia refractiva es menor. Se deduce que la mayor parte de la refracción ocular tiene lugar en la superficie anterior de la córnea, cuyo poder refractivo (unas 40-45 D) es más del doble del que posee el cristalino (alrededor de 20 D). Sin embargo, una característica muy importante del cristalino es que su potencia puede cambiar cuando el ojo necesita acomodar a diferentes distancias. Este proceso se llama acomodación y se debe a una alteración en la forma de la lente.

El diámetro del haz de luz incidente se controla mediante el iris, que forma el diafragma del ojo. La abertura en el iris se llama pupila. Como ocurre

en todos los sistemas ópticos, el diafragma es un componente muy importante del sistema que afecta a un amplio rango de procesos ópticos.

1.2.1 Potencia equivalente y distancias focales

En cualquier sistema óptico centrado con una determinada potencia equivalente, existen tres pares de puntos cardinales situados sobre el eje óptico, los puntos focales, los puntos principales y los puntos nodales. Las posiciones de estos puntos cardinales en el ojo dependen de su estructura y del nivel de acomodación. Para un ojo enfocado al infinito, las posiciones aproximadas de estos puntos cardinales se muestran en la *Figura 1.1*. Estos puntos cardinales están definidos únicamente para la zona paraxial y son los siguientes:

- 1- Puntos focales (F y F'). La luz procedente del foco objeto emerge después de la refracción en el ojo paralela al eje óptico. Los rayos procedentes de una distancia infinita que inciden en el ojo paralelos al eje óptico pasan todos ellos por el punto focal imagen F' .
- 2- Puntos principales (H y H'). Son puntos conjugados (uno imagen del otro), cuyo aumento lateral es $+1$. Es decir, si se situara un objeto en uno de estos puntos, se formaría una imagen derecha del mismo tamaño en el otro punto.
- 3- Puntos nodales (N y N'). También son puntos conjugados sobre el eje para los cuales el aumento angular es la unidad positiva. Tienen la propiedad de que todo rayo que entra en el sistema por el punto nodal objeto, formando con el eje un ángulo u , sale del sistema pasando por el punto nodal imagen N' , formando con el eje un ángulo u' igual a u . Este rayo se conoce como rayo nodal, y cuando el punto fuera del eje es el punto de fijación, el rayo se puede llamar eje visual.

Una de las propiedades más importantes de cualquier sistema óptico es su potencia equivalente. Esta es una medida de la habilidad del sistema para inclinar o desviar los rayos de luz. Cuanto más alta sea la potencia del sistema mayor es la habilidad para desviar los rayos. La potencia equivalente de un

sistema óptico se denomina por el símbolo F . La potencia equivalente del ojo está relacionada con las distancias entre los puntos focales y principales mediante la ecuación

$$F = \frac{n'}{H'F'} = -\frac{n}{HF}$$

donde n' es el índice refractivo en la cámara vítrea. La potencia promedio del ojo adulto es de aproximadamente 60 D, pero los valores varían bastante de un ojo a otro. Usando esta potencia y el índice de refracción n' comúnmente aceptado de la cámara vítrea (1,336), las distancias focales del ojo son

$$HF = -16,67 \text{ mm y } H'F' = +22,27 \text{ mm}$$

Mientras la potencia equivalente del ojo es una propiedad muy importante del ojo, no es fácil medirla directamente. Su valor generalmente se obtiene de otras cantidades como el radio de curvatura de la superficie, separaciones entre superficies y longitud del ojo, y asumiendo índices refractivos de los medios oculares.

En el ojo se sitúan un determinado número de ejes. La *Figura 1.1* muestra dos de estos: el eje óptico y el eje visual. El eje óptico se define generalmente como la línea que une los centros de curvatura de las superficies refractivas. Sin embargo, el ojo no tiene una simetría de rotación perfecta, y por lo tanto incluso si las cuatro superficies refractoras tuvieran simetría rotacional, los cuatro centros de curvatura no serían co-lineales. Así, en el caso del ojo, se define el eje óptico como la línea que más se ajusta a través de estos puntos no co-lineales. El eje visual se define como la línea que une el objeto de fijación o interés y la fovea, y que pasa a través de los puntos nodales.

1.3 LA CÓRNEA

La córnea, de mayor curvatura que el globo ocular, es una estructura altamente transparente en forma de menisco. Una capa muy fina de fluido lacrimal cubre normalmente la superficie anterior, pero es demasiado fina para

afectar de forma apreciable a la potencia y se puede ignorar en este contexto. Vista de frente, la córnea tiene un diámetro alrededor de 12 mm, ligeramente más pequeño verticalmente que horizontalmente.

El radio medio de la superficie corneal anterior es de aproximadamente 7,7 mm, estando los valores de la parte central comprendidos entre 7 y 8,6 mm. En casi el 84% de todos los ojos, el radio está entre 7,5 y 8,2 mm. Los diferentes procedimientos de medida del radio de curvatura se basan en el principio de considerar la córnea como un espejo esférico convexo. Existen métodos fotográficos que miden el radio a través de la fotografía de la imagen corneal de un objeto de forma y tamaño conocidos, y métodos que miden directamente el tamaño de la imagen corneal que se forma por reflexión sobre la superficie anterior de la córnea de un objeto de dimensiones conocidas.

El radio de curvatura de la superficie posterior de la córnea tiene un valor medio de aproximadamente 6,8 mm, menor que el de la cara anterior, lo que determina que la córnea tenga una forma de menisco cóncavo donde los bordes son más gruesos que el centro. El espesor central tiene valores entre 0,5 y 0,6 mm y el espesor periférico alrededor de 0,7 mm.

En cuanto al índice de refracción, cada capa de la cornea tiene su propio índice de refracción, pero puesto que el estroma es la capa más gruesa, su índice de refracción es el que predomina, éste se sitúa entre 1,36 y 1,38 un valor intermedio entre el colágeno (1,55) y la sustancia fundamental (1,34). Para las lágrimas se considera un índice de 1,336.

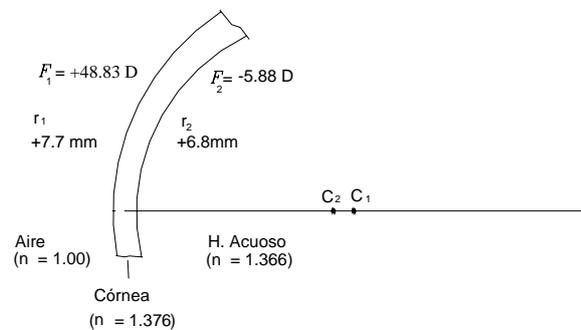


Figura 1.2. Perfil de la córnea humana.

En una primera aproximación, el sistema óptico de la córnea se puede considerar formado por dos superficies esféricas que separan tres medios ópticamente distintos, el aire, la córnea y el humor acuoso (*Figura 1.2*). Generalmente el valor medio del índice refractivo de la córnea se toma como 1,376 y el del humor acuoso, en contacto con la superficie posterior de la córnea, como 1,336.

Las potencias de las dos superficies de la córnea se calculan a partir de los radios de curvatura, aplicando la ecuación de la potencia (F) para superficies refractivas esféricas,

$$F = \frac{n' - n}{R}$$

donde n y n' son los índices de refracción en el lado incidente y refractado, respectivamente.

a) Potencia de vértice de la superficie anterior de la córnea:

$$n = 1 \text{ (aire)} ; n' = 1,376 \text{ (córnea)} ; R = 7,7 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$F_1 = 48,83 \text{ D.}$$

b) Potencia de vértice de la superficie posterior de la córnea:

$$n = 1,376 \text{ (córnea)} ; n' = 1,336 \text{ (humor acuoso)} ; R = 6,8 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$F_2 = -5,88 \text{ D.}$$

Si los dos dióptrios estuviesen en el aire formarían un sistema divergente pero de la relación de los índices de refracción de los medios que separan resulta un sistema convergente con una potencia total de aproximadamente +43 D, que representa alrededor de dos tercios de la potencia total del ojo, y que se puede calcular a partir de la ecuación de una lente gruesa:

$$F = F_1 + F_2 - d/n F_1 F_2$$

Donde F_1 es la potencia de la superficie anterior, F_2 es la potencia de la superficie posterior, d es el espesor de la córnea en el vértice y n es el índice de refracción de la córnea.

Los anteriores valores de potencia de las superficies de la córnea se aplican a los vértices de la córnea, y solamente se aplicarían a otras partes de las superficies corneales si estas fueran esféricas. Sin embargo, ni la superficie anterior ni la posterior son perfectamente esféricas, debido tanto a la toricidad como a la asfericidad. Por lo tanto, el radio de curvatura no describe totalmente la forma de la córnea y sus propiedades refractivas.

Las posiciones de los puntos principales de la córnea dependen de los radios de curvatura de las superficies anterior y posterior, del espesor corneal y de los índices refractivos. Ambos puntos principales se sitúan delante de la córnea (*Figura 1.2*)

1.3.1 Forma de la superficie anterior

Generalmente la superficie anterior de la córnea es tórica. En los ojos jóvenes el radio de curvatura en el meridiano horizontal tiende a ser mayor que en el meridiano vertical, pero esta tendencia se invierte con el incremento de la edad. Esta característica de toricidad produce astigmatismo.

La superficie anterior de la córnea también se caracteriza por un aumento progresivo del radio de curvatura conforme aumenta la distancia al ápex de la superficie, que resulta en un aplanamiento de la superficie hacia la periferia y en una disminución de la potencia. Las superficies que no son esféricas en este sentido, se describen con frecuencia como asféricas. El aplanamiento está determinado no sólo por el aumento progresivo del radio de curvatura sino también por el desplazamiento lateral de los centros de curvatura periféricos en relación con los centrales, lo que origina que el aplanamiento sea menos pronunciado del que causaría el simple aumento del radio de curvatura. Este aplanamiento de la córnea sirve para reducir la aberración esférica y para que la unión con la parte principal del globo ocular sea suave.

La mejor representación esquemática de la superficie frontal de la córnea es un elipsoide. La *Figura 1.3* muestra una elipse con su eje mayor coincidiendo con el eje x de coordenadas Cartesianas y su vértice V en el origen O . El punto C_0 es el centro de una esfera de radio r_0 que tiene la misma curvatura que el elipsoide en su vértice V . La ecuación de cualquier sección cónica situada simétricamente, con su vértice en O se puede escribir como

$$y^2 = 2 r_0 x - p x^2$$

en la que p es un parámetro que define cualquier familia de cónicas que tenga el mismo radio vértice r_0 . Para un círculo, $p = 1$, mientras que para una parábola $p = 0$. Valores intermedios de p definen elipses de diferentes dimensiones y forma y valores negativos de p definen una familia de hipérbolas. Un valor de p entre 0,6 y 0,8 es probablemente la mejor aproximación a la forma de la córnea.

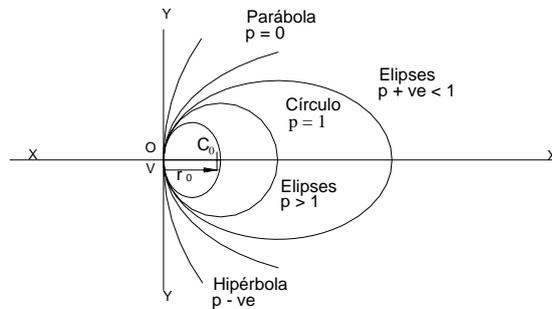


Figura 1.3. Secciones cónicas con el mismo radio de curvatura r_0 en el polo. La revolución de la curva alrededor del eje de las x representa una córnea esférica esquemática con aplanamiento periférico en su curvatura.

La zona central de la córnea (zona óptica) es la región más importante desde el punto de vista de la óptica ocular ya que es la que actúa fundamentalmente en la formación de las imágenes retinianas en visión fotópica (diurna). Esta zona se puede considerar casi esférica, de 4 mm de diámetro aproximadamente. Sin embargo, en la visión nocturna también

interviene la parte periférica de la córnea ya que en esta situación la pupila se dilata.

La forma de la superficie posterior de la córnea es de menor importancia que la forma de la superficie anterior debido a la pequeña diferencia del índice refractivo en el límite posterior de la córnea.

1.4 LA CÁMARA ANTERIOR

La cámara anterior es la cavidad situada detrás de la córnea y delante del iris y del cristalino. Está rellena de un líquido incoloro cuyo contenido en agua es del 98% por lo que se denomina humor acuoso y que a diferencia de los otros medios ópticos que componen el ojo presenta un índice de refracción perfectamente definido en toda su extensión siendo por ello un medio homogéneo.

La profundidad de la cámara anterior, medida a lo largo del eje óptico, está determinada por la distancia desde el vértice de la cara posterior de la córnea hasta el polo anterior del cristalino, pero a veces también se incluye en esta medida el espesor corneal. Sus valores están entre 3 y 4,5 mm, aceptándose un valor medio de 3,6 mm.

La potencia del sistema óptico ocular está ligeramente afectada por la profundidad de la cámara anterior, de tal manera que si todos los demás elementos no cambiasen, una disminución de 1 mm en la profundidad de la cámara anterior incrementaría la potencia total del ojo aproximadamente 1,4 D y un aumento de la profundidad disminuiría proporcionalmente la potencia dióptrica ocular.

1.5 EL IRIS Y LA PUPILA

El borde libre del iris está situado casi tangencialmente a la primera superficie del cristalino, su función es regular la cantidad de luz que pasa hacia la retina a través de la pupila. Ésta es una abertura central circular que varía de diámetro en función del nivel de iluminación pasando desde 2-3 mm con luz brillante hasta alrededor de 8 mm en condiciones de oscuridad. Aún

considerando, situaciones de idéntica iluminación existen importantes variaciones individuales en los diámetros pupilares. Así, alrededor de los 25 años el diámetro puede estar entre 3 mm y 6 mm en el ojo adaptado a la luz.

El tamaño de la pupila disminuye conforme aumenta la edad. Para el ojo adaptado a la luz se pueden considerar diámetros típicos de 4,8 mm a los 10 años, 4,0 mm a los 45, y 3,4 mm a los 80 años. Para el ojo en la oscuridad total los diámetros más frecuentes son, 7,6 mm a los 10 años, 6,2 mm a los 45, y 5,2 mm a los 80 años.

1.6 LALENTE DEL CRISTALINO

El cristalino, que está contenido en una cápsula elástica, es una lente biconvexa de potencia dióptrica variable que puede enfocar a diferentes distancias gracias al mecanismo de la acomodación y cuya característica principal es su heterogeneidad física y óptica (*Figura 1.4*). La superficie anterior está en contacto con la cara posterior del iris y está bañada por el humor acuoso, mientras que la superficie posterior está en contacto con el humor vítreo, un gel transparente que ocupa el segmento posterior del ojo y cuyo índice refractivo se puede considerar igual al del humor acuoso 1,336.

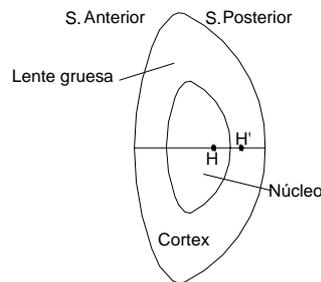


Figura 1.4. Corte o sección transversal del cristalino mostrando la posición aproximada de sus puntos principales.

El cristalino tiene una estructura en capas muy compleja con un gradiente de índice no-uniforme. A lo largo de toda la vida la lente continua su crecimiento en grosor mediante la formación de nuevas capas de fibras en la parte externa. Como resultado normal de este proceso de envejecimiento la lente pierde flexibilidad y transparencia con el aumento de la edad.

La cápsula del cristalino juega un importante papel en el proceso de acomodación. Los ligamentos suspensorios de la zónula de Zinn, que se extienden desde la periferia de la cápsula elástica que rodea el cristalino hasta el cuerpo ciliar, sostienen la lente y controlan la curvatura de sus superficies a través de las variaciones en la tensión de la zónula producidas por la acción del músculo ciliar. Este proceso origina un cambio en la potencia equivalente del cristalino y por lo tanto en la potencia ocular, permitiendo al ojo enfocar objetos a diferentes distancias.

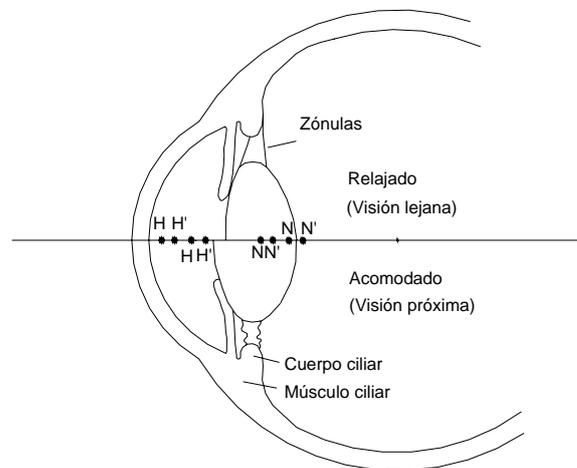


Figura 1.5. Efecto de la acomodación en la forma de la lente, y en la posición los puntos principales y nodales del ojo.

El diámetro frontal o ecuatorial del cristalino es de aproximadamente 8,5 a 10 mm. El espesor central, que es la distancia entre los polos o vértices de las dos superficies, tiene un valor medio en el ojo adulto sin acomodar alrededor de 3,7 mm, que con la edad aumenta. Durante la acomodación, el espesor

central se incrementa y el vértice de la superficie anterior se desplaza hacia delante reduciendo la profundidad de la cámara anterior. También con la edad esta profundidad se hace cada vez menor. En la *Figura 1.5* se muestra la forma y posición del cristalino en su estado relajado y completamente acomodado y el cambio de posición de los puntos principales y nodales del ojo.

Los valores de los radios de curvatura de las superficies del cristalino se deben considerar con precaución debido a que cambian con la acomodación, a que son altamente dependientes de la edad y a que cualquier medida del cristalino *in vivo* depende del conocimiento de los valores de todos los parámetros ópticos que preceden la superficie en cuestión. Este es un problema más acusado con la superficie posterior debido a la incertidumbre de la distribución del índice refractivo en un determinado cristalino.

El método más común para la determinación del radio de curvatura de las superficies lenticulares es mediante la medida de las imágenes de Purkinje, que son las imágenes de un objeto formadas por reflexión especular en las superficies oculares.

La curvatura de la superficie anterior en reposo es más plana que la de la cara posterior. Se puede considerar un valor medio para el radio de curvatura anterior de unos 11 mm y de unos 6,5 mm para el radio posterior. La forma de ambas superficies presenta cierta asfericidad, por lo que la curvatura se aplana hacia la periferia.

La distribución del índice de refracción del cristalino varía según los diferentes puntos que se consideren ya que se trata de un medio ópticamente heterogéneo debido a su estructura en capas y a la compresión ejercida sobre las capas más internas. En la zona biconvexa central llamada núcleo el índice de refracción es casi constante con un valor alrededor de 1,41, que es más elevado que el de la zona cortical periférica que lo rodea (1,38), donde las variaciones en el índice son mayores. Este aumento progresivo de la densidad óptica hacia el interior aumenta notablemente el poder convergente del cristalino y produce una progresiva y continua refracción de los rayos. Asimismo puede mejorar la calidad de la imagen mediante la reducción de la aberración esférica.

En la *Figura 1.6 b)* se muestra como una placa de lados paralelos con un índice de refracción que disminuye desde el centro hacia la periferia, como es el

caso del cristalino, actúa como una lente convergente. Este comportamiento se debe a que la velocidad de la luz en un medio es inversamente proporcional a su índice refractivo, de tal manera que un frente de ondas se retrasaría progresivamente en su paso desde la periferia hacia el centro y adoptaría una forma convergente. Si además las superficies tienen una curvatura dada, como en c), la influencia doble de las superficies refractantes y la densidad aumentan notablemente el poder de convergencia.

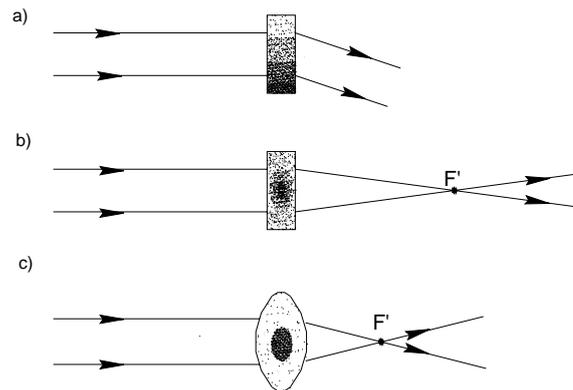


Figura 1.6. a) Refracción en una placa de vidrio de densidad óptica desigual, b) una placa de lados paralelos actúa como una lente convergente si el punto de mayor densidad está en el centro, c) el poder de convergencia aumenta si los lados tienen una curvatura dada.

En el cristalino el efecto convergente aumenta todavía más por el hecho de que las diversas capas no son estrictamente concéntricas. La curvatura de las capas exteriores es menor que la de las interiores, de modo que el núcleo central comparado con la parte externa de la corteza es aproximadamente esférico. Así, cada capa sucesiva con densidad óptica más elevada y curvatura mayor dan lugar una lente cada vez más potente.

Esta estructura del cristalino y la potencia, comparativamente mayor de su núcleo, tienen gran importancia biológica ya que permiten a) una mayor potencia refractiva, b) una disminución de errores ópticos como las

aberraciones esférica y cromática, c) una reducción de la dispersión de luz dentro del ojo, y d) que la acomodación se ejerza con un margen cerca del doble del que le correspondería al cristalino sino tuviera esas características.

Por todo lo anterior, el estudio óptico del cristalino presenta una dificultad técnica notable en cuanto a la marcha de los rayos refractados ya que siguen una trayectoria curvilínea que difícilmente puede ser explicada por una óptica geométrica elemental. Sin embargo, si el cristalino real con su índice de gradiente se reemplaza por una lente con el mismo espesor, superficies esféricas con los mismos radios de curvatura, y se asume un índice refractivo homogéneo, este índice debe ser superior que el índice real máximo (1,41). Así, el valor del índice refractivo equivalente con frecuencia se considera de 1,422 para que la potencia del cristalino se aproxime al valor real de +21 D.

1.6.1 Acomodación

Durante la acomodación, cuando el ojo necesita cambiar el enfoque desde objetos lejanos a cercanos, el músculo ciliar se contrae disminuyendo la tensión en los ligamentos suspensores que sujetan al cristalino. La relajación de las zónulas permite que ambas superficies de la lente, y especialmente la anterior, adopten una forma más curvada, engrosando el cristalino en el centro y desplazándose la superficie frontal ligeramente hacia delante. Estos cambios dan lugar a un incremento en la potencia equivalente del ojo.

En un ojo relajado enfocado para el infinito, la potencia equivalente del cristalino es aproximadamente 19 D. En un ojo acomodando a un punto a 10 cm de la córnea, la potencia del cristalino es aproximadamente de 30 D.

Se debe de tener en cuenta que el nivel de acomodación se mide como la vergencia del objeto enfocado, y ésta no se debe confundir con la potencia del ojo. Para el ojo relajado, el nivel de acomodación es cero, pero la potencia del ojo es aproximadamente 60 D. Aunque el nivel de acomodación y el incremento en la potencia del cristalino no son lo mismo, son variables que están muy relacionadas.

1.7 LA RETINA

La retina se extiende sobre la superficie interna de la parte posterior del globo ocular hasta casi el cuerpo ciliar, internamente está en contacto con el cuerpo vítreo y externamente con la coroides. Su estructura es muy compleja tanto anatómica como funcionalmente ya que se trata de una prolongación del sistema nervioso central donde comienza el proceso de análisis de la información luminosa. La retina contiene dos tipos de fotorreceptores, bastones y conos, que constituyen dos sistemas distintos que operan a diferentes niveles de luminancia. Los conos son responsables de la visión diurna y los bastones funcionan con la débil luz que está presente en el crepúsculo y en la oscuridad.

La parte central de la retina, llamada *mácula lútea*, se distingue por la presencia de un pigmento carotenóide amarillo no fotolábil y por tener mayor densidad de conos que la retina periférica. Esta zona macular tiene un diámetro de 5,5 mm y en su centro existe una depresión o *fóvea* aproximadamente circular de 1,5 mm de diámetro (5° subtendidos en el punto nodal imagen) con un área central de mayor sensibilidad para la percepción de los detalles, la *foveola*, poblada solamente por conos muy finos. Cuando los dos ojos dirigen la mirada hacia un objeto su imagen se sitúa sobre cada una de las fóveas.

La zona de la retina de entrada del nervio óptico se llama disco óptico o papila óptica. En ella no hay conos ni bastones y por lo tanto representa un punto ciego en el campo visual del sujeto.

Desde un punto de vista óptico, la retina es la pantalla sobre la que se forma la imagen. Se puede considerar como parte de una superficie esférica cóncava con un radio de curvatura alrededor de -12 mm. Esta curvatura se aproxima a las condiciones ópticas ideales para obtener una mayor eficacia de la visión periférica.

1.8 EL OJO ESQUEMÁTICO PARAXIAL

Para estudiar muchas propiedades ópticas del sistema ocular, se pueden construir modelos de ojos usando valores medios de los parámetros oculares de la población. Esto se puede hacer a diferentes niveles de sofisticación. Si se

asume que las superficies refractivas son esféricas y centradas sobre un eje óptico común, y que los índices refractivos son constantes en cada medio, esto da una familia de modelos conocidos como ojos esquemáticos paraxiales ya que solamente son exactos en la región paraxial. Esta región se define en óptica geométrica como la región en la que la sustitución de los senos de los ángulos por los ángulos no conduce a un error apreciable.

En el ojo esquemático las superficies refractivas de la córnea y el cristalino son perpendiculares al eje óptico y sus centros de curvatura están situados sobre él con una desviación pequeña que se puede despreciar. El eje óptico pasa por el vértice de la córnea, por el centro geométrico del ojo y por el polo posterior. Sin embargo, en el ojo humano el cristalino se encuentra ligeramente descentrado e inclinado con relación a la córnea. Es decir, el ojo no posee un auténtico eje óptico. Pero como los puntos principales tanto de la córnea como del cristalino están muy próximos se puede considerar una buena aproximación un eje óptico que pase por estos dos pares de puntos.

Una de las principales aplicaciones de los ojos esquemáticos paraxiales es predecir las propiedades Gaussianas de los ojos reales. De estas, probablemente las más importantes son la potencia equivalente F , las posiciones de los seis puntos cardinales (F , F' , H , H' , N y N') y las posiciones y aumentos de las pupilas.

1.8.1 Potencia equivalente y puntos cardinales

La potencia equivalente media del ojo esquemático es aproximadamente de +60 D y los valores de n y n' son 1,0 y 1,336 respectivamente. Sus puntos cardinales están situados como se muestra en la *Figura 1.7*, los puntos principales objeto e imagen, H y H' están situados en la cámara anterior entorno a 1,5 y 1,8 mm de distancia respectivamente desde la superficie anterior de la córnea, siendo la separación entre ellos de 0,3 mm. Los puntos nodales, N y N' , también están separados 0,3 mm y cerca de la superficie posterior de la lente del cristalino. La distancia focal objeto HF es alrededor de -16,67 mm y la distancia focal imagen $H'F'$ alrededor de +22,27 mm. La distancia HN y $H'N'$ es de 5,6 mm.

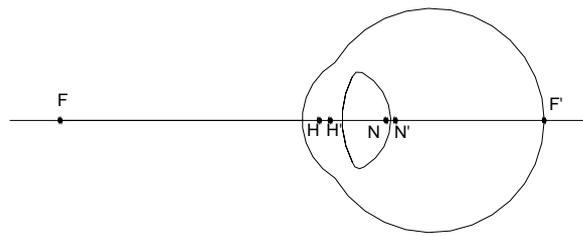


Figura 1.7. Los puntos cardinales del ojo esquemático en estado relajado.

1.8.2 Las pupilas de entrada y salida

Desde el punto de vista óptico, la pupila real hace el papel de diafragma del sistema ocular limitando los rayos luminosos que pasan al interior del ojo. A este diafragma corresponde en el espacio objeto una pupila de entrada y en el espacio imagen una pupila de salida.

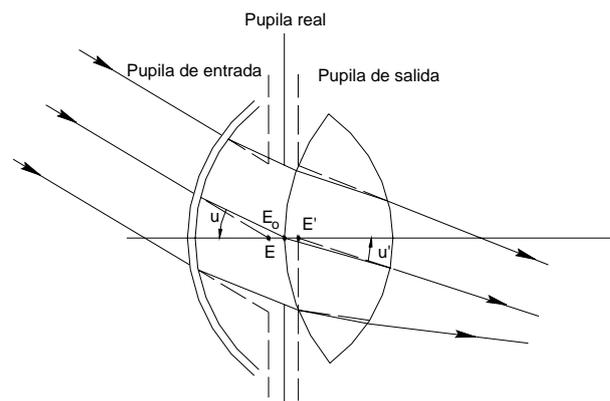


Figura 1.8. La pupila real del ojo y sus imágenes, las pupilas de entrada y salida, con sus centros respectivos en el eje óptico.

En el caso de que el diafragma o pupila real esté situado entre dos lentes, como ocurre en el ojo, la pupila de entrada es la imagen de la pupila real a

través de la lente que le precede, es decir la córnea. Esta pupila de entrada es la que se ve cuando se observa el ojo de un sujeto. La pupila de salida es la imagen de la pupila real cuando ésta se considera un objeto para el cristalino (*Figura 1.8*).

Estas pupilas son conjugadas, es decir, cada una de ellas deja pasar todos los rayos que atraviesan la otra. Si un pincel de rayos se dirige hacia la pupila de entrada (centro en E) y la llena completamente, éste pasará a través de toda el área de la pupila real (centro en E_0) después de refractarse en la córnea y, cuando finalmente emerge en el cuerpo vítreo, parecerá que ha sido limitado por la pupila de salida (centro en E'). Asimismo, los puntos del eje E y E' son conjugados respecto del sistema óptico ocular.

En cualquier sistema óptico simétrico rotacionalmente, las pupilas están centradas. Sin embargo, las pupilas de los ojos reales están generalmente descentradas, con frecuencia están desplazadas nasalmente alrededor de 0,5 mm con relación al eje óptico.

En cuanto a la posición y tamaño de las pupilas, la pupila de entrada está situada aproximadamente 3 mm detrás de la superficie anterior de la córnea y es un 13% mayor que la pupila real. La pupila de salida se encuentra muy próxima a la pupila real, detrás de ella, y es solo un 3% mayor de diámetro.

Si se quieren analizar las propiedades ópticas del ojo, dos rayos útiles y especiales son el rayo marginal paraxial y el rayo pupilar paraxial (también rayo principal paraxial). El rayo marginal paraxial es el rayo paraxial que parte de un punto objeto sobre el eje, que pasa a través de los bordes de las pupilas y se dirige hacia un punto imagen (que también debe estar sobre el eje). Este rayo y el ángulo α' dentro del ojo son útiles, por ejemplo, para determinar el nivel de iluminación en retina. El rayo pupilar paraxial es el rayo paraxial que parte de un punto objeto, en el borde del campo de visión, que pasa a través de los centros de las pupilas (*Figura 1.9*). Este rayo es útil para calcular la posición de las imágenes retinianas fuera del eje, y ambos rayos son útiles en la estimación de las aberraciones del ojo.

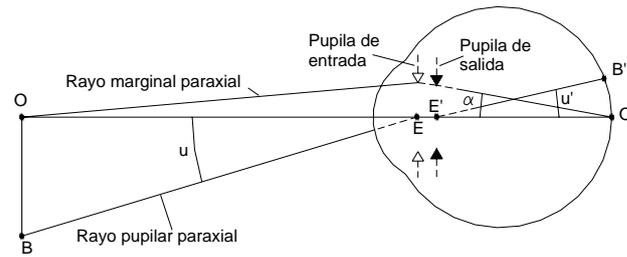


Figura 1.9. Las pupilas de entrada y salida del ojo y los rayos pupilar y marginal paraxiales.

1.9 LOS EJES DEL OJO

La mayoría de los sistemas ópticos hechos por el hombre tienen simetría de rotación alrededor de una línea, el eje óptico. Si las superficies refractoras son esféricas, ésta es la línea que une los centros de curvatura de estas superficies. Algunos sistemas tienen componentes astigmáticos o tóricos y tienen dos planos de simetría; la línea de intersección de estos dos planos es el eje óptico.

Por el contrario, para describir plenamente las propiedades ópticas del ojo, es necesario introducir un número de ejes. Esto es debido a la carencia de simetría del ojo y debido a que el punto de fijación y la fovea no se sitúan a lo largo del eje de simetría más adecuado.

En la fovea es donde se forma la imagen del punto de fijación, alrededor del cual se ordenan todos los objetos del campo visual. Sin embargo, la fovea no suele estar situada en la intersección de la retina con el eje óptico, sino desplazada hacia abajo aproximadamente 1,25 mm por el lado temporal. Por lo tanto, cuando miramos un objeto no lo hacemos directamente a lo largo del eje óptico sino a lo largo de una línea que une el objeto o punto de fijación con la fovea y que se llama *eje visual*.

Según algunos autores se considera que el eje visual pasa por los puntos nodales N y N' antes de intersectar en la fovea e incluso, sin introducir errores

importantes, por la posición media entre los dos puntos nodales y la fovea. Sin embargo, siguiendo a Bennett y Rabbets, el término eje visual debe referirse al eje o rayo principal del pincel de rayos real que atraviesa la pupila y converge en la fovea. Es decir, el camino del rayo que se dirige hacia el centro (E) de la pupila de entrada y cuyo rayo refractado conjugado alcanza la fovea, M' (*Figura 1.10*).

En el plano vertical, el eje visual en el espacio objeto está ligeramente por encima del eje óptico. De modo que cuando el ojo mira directamente hacia un objeto, el eje óptico se dirige ligeramente hacia abajo y hacia el lado temporal.

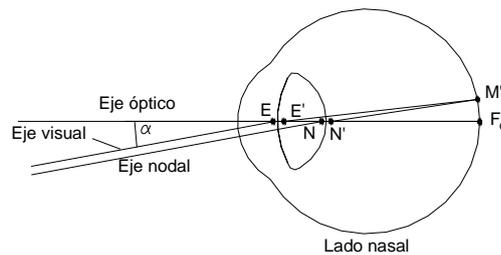


Figura 1.10. Ejes visual y nodal del ojo.

El ángulo formado entre el eje visual y el eje óptico se llama ángulo alfa. Cuando el eje visual en el espacio objeto se sitúa en el lado nasal respecto del eje óptico el ángulo alfa es positivo y mide alrededor de 5° . Cuando los dos ejes coinciden, el eje óptico pasa por la fovea y el ángulo es cero. A veces el eje visual está en el lado temporal con relación al eje óptico, en este caso el ángulo alfa es negativo. En el ojo hipermetrope el ángulo alfa es mucho mayor que en ojo normal llegando a medir 10° , mientras que en el ojo miope es menor de 2° incluso negativo.

El *eje nodal* se refiere al rayo que pasa a través de los puntos nodales. En este caso, a una extensión lineal de retina que subtienda un ángulo conocido en el punto nodal imagen le corresponderá una extensión angular igual en el espacio objeto (*Figura 1.11*). Así, conociendo el tamaño angular de la imagen en

la retina, se puede calcular el tamaño angular percibido en el espacio objeto a una determinada distancia.

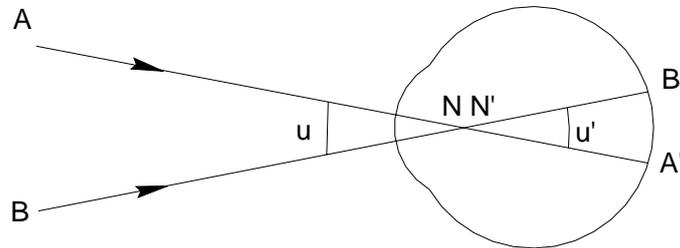


Figura 1.11. Proyección visual a través de los puntos nodales.

Por ejemplo; para un diámetro de la fovea de 1,5 mm, su tamaño angular en N' es el ángulo subtendido por la fovea en el punto nodal imagen y que se obtiene de la relación

$$u = \text{diámetro de la fovea} / N'F' = 1,5 / 16,67 = 0,09 \text{ radianes}$$

la distancia del punto nodal imagen al centro de la mácula (M') en el modelo de ojo esquemático es aproximadamente de 16,67 mm.

A una distancia de lectura de 350 mm, este ángulo cubrirá un área de 31,5 mm de diámetro, anchura suficiente para la lectura.

Otros ejes a tener en cuenta son el eje pupilar y el eje de fijación. El *eje pupilar* es la línea que pasa a través del centro de la pupila de entrada, y que es normal a la córnea (*Figura 1.12*). Este eje se usa como una medida objetiva para juzgar la cantidad de fijación excéntrica, la condición en que la fijación se realiza a través de un punto retiniano diferente del centro de la fovea. La fijación excéntrica es una adaptación a la heterotropía (estrabismo).

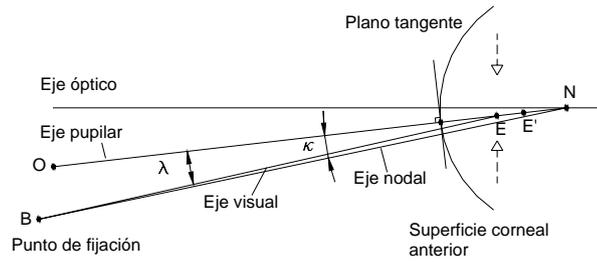


Figura 1.12. El eje pupilar y el eje visual.

Si el ojo fuera un sistema centrado y la pupila estuviese también centrada, el eje pupilar se encontraría a lo largo del eje óptico. Sin embargo, con frecuencia la pupila no está centrada con relación a la córnea y, además, la forma de la córnea podría no ser regular. Ambos factores originan que el eje pupilar esté en cualquier otra dirección, y en general no pasa por el punto de fijación como se muestra en la *Figura 1.12*. El ángulo formado entre el eje pupilar y el eje visual se llama ángulo lambda (λ) y es importante para el diagnóstico de la fijación excéntrica y heterotropía. El ángulo formado entre el eje pupilar y el eje nodal se conoce como ángulo kappa (κ) y en términos prácticos, es el mismo que el ángulo λ .

El *eje de fijación* es la línea que pasa a través del punto de fijación y del centro de rotación del ojo. Este eje es la referencia para la medida de los movimientos del ojo. El ángulo que se forma entre el eje de fijación y el eje óptico se llama ángulo gamma (γ).

1.10 EL CAMPO VISUAL

En el lado temporal, donde no hay obstáculos anatómicos, el campo visual se extiende más allá de 90° del eje óptico. El rayo más extremo que entra al ojo desde este lado sigue aproximadamente el camino indicado en la *Figura 1.13*. Este diagrama también explica porque la retina se extiende tan lejos.

La nariz, la ceja y la mejilla limitan el campo visual monocular en otras direcciones, de tal manera que su forma es irregular, siendo el límite de 60° en el lado nasal.

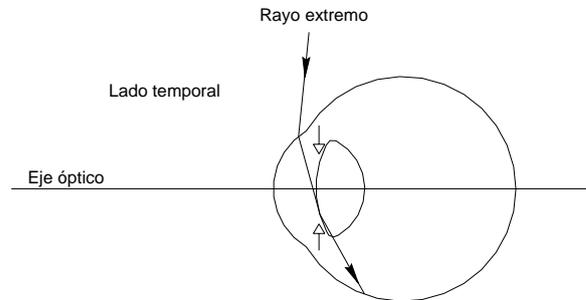


Figura 1.13. Camino del rayo en el límite del campo visual del ojo.

A la papila o disco óptico de la retina, que carece de fotorreceptores, le corresponde una “mancha ciega” en el campo visual monocular. El disco óptico mide alrededor de 2 mm verticalmente por 1,5 mm horizontalmente, subtendiendo un ángulo de alrededor de 7° por 5° en el punto nodal imagen. Éste es también el ángulo subtendido por la región ciega en el espacio. El centro del disco óptico está aproximadamente a 15° nasalmente de la fovea y $1,5^\circ$ hacia arriba (Figura 1.14). En consecuencia, la mancha ciega está situada 15° temporalmente y $1,5^\circ$ hacia abajo con relación al punto de fijación. La Figura 1.15 proporciona una demostración de la mancha ciega.

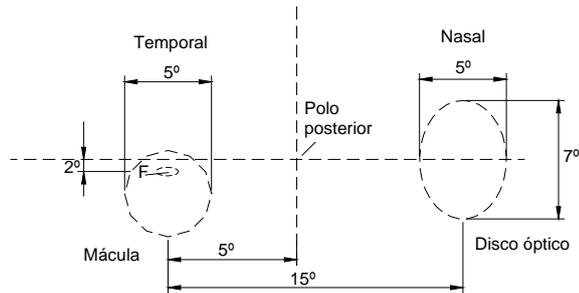


Figura 1.14. Tamaño y posición angular respecto al plano focal imagen de la mácula, la fovea (F) y el disco óptico.



Figura 1.15. Demostración de la mancha ciega. Mirar fijamente la cruz con el ojo derecho (el ojo izquierdo cerrado) desde una distancia aproximada de 20 cm. Variar esta distancia hasta encontrar una posición en la que la mancha negra desaparezca.

El uso de los dos ojos proporciona una percepción mejor del mundo exterior que un ojo solo y debido al desplazamiento lateral entre ellos es posible la percepción tridimensional del mundo, que incluye la percepción de profundidad conocida como estereopsis.

1.11 EL OJO REDUCIDO

En el modelo de ojo esquemático paraxial los puntos principales objeto e imagen y los puntos nodales objeto e imagen, están sumamente juntos, tan cerca, de hecho, que no supondría una gran alteración sustituir cada par por un

punto intermedio, considerándolos como uno. También se pueden sustituir las cuatro superficies oculares por una única superficie refractiva sin introducir ningún error apreciable. De esta forma se obtiene el modelo de ojo reducido, que a pesar de su simplicidad describe adecuadamente la óptica del ojo en el contexto de la aproximación paraxial en la mayoría de las situaciones.

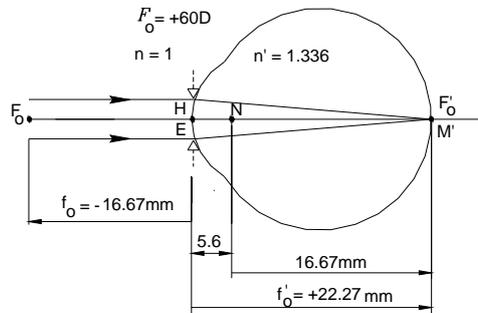


Figura 1.16. Modelo de ojo reducido.

Este modelo de ojo reducido tiene una potencia de +60,00 D y la única superficie esférica convexa que tiene separa el aire de un solo medio refringente de índice de refracción n' similar al del humor vítreo, 1,336 (Figura 1.16). Con estos valores, las distancias focales coinciden aproximadamente con las del ojo esquemático;

$$f_o = SF_o = -\frac{1000}{F_o} = -\frac{1000}{+60} = -16,67 \text{ mm} \quad \text{mm}$$

$$f'_o = SF'_o = \frac{1000 \cdot n'}{F_o} = \frac{1000 \cdot 1,336}{+60} = +22,27 \text{ mm}$$

Esta distancia focal imagen corresponde a la longitud axial del ojo reducido, que es aproximadamente 2 mm más pequeño que el ojo esquemático.

Para mantener una potencia similar a la de los ojos más complejos, el radio de curvatura de la superficie refractiva única es mucho más pequeño que el de los valores reales y se obtiene de

$$R = \frac{1000 \cdot (n' - 1)}{F_o} = \frac{336}{+60} = 5,6 \text{ mmz}$$

En el caso de una sola superficie refractiva que separa medios de índices n y n' , los puntos principales coinciden uno con otro en el vértice de la superficie designado por H y los puntos nodales coinciden uno con otro en el centro de curvatura de la superficie, que se indica como N. Por lo tanto, la distancia entre el punto principal y el punto nodal se mantiene igual que en el modelo de ojo esquemático, $HN = H'N' = 5,6 \text{ mm}$, distancia que en el ojo reducido también coincide con su radio de curvatura.

El eje visual y el eje óptico coinciden ya que se acepta por comodidad que la fovea está situada en el polo posterior del ojo sobre el eje óptico que pasa a través de H y N. Por otra parte, si el foco imagen coincide con M' cuando el ojo está enfocado para objetos lejanos se dice que el ojo es “emétrope”.

Otra simplificación del modelo de ojo reducido es considerar que la pupila se encuentra en la superficie reducida, y como no hay superficies refractivas delante o detrás de ella, las pupilas de entrada y salida coinciden con la superficie; es decir la pupila y sus imágenes son conjugadas consigo mismas. En este caso, el punto principal situado en el vértice también hace la función de centro de la pupila.

En la *Figura 1.17* se comparan el ojo reducido y el ojo esquemático, y se observa como las posiciones de los puntos cardinales se mantienen en las mismas posiciones para los dos modelos. El punto principal del ojo reducido corresponde a la posición intermedia entre los dos puntos principales del ojo esquemático, por lo tanto, el vértice del ojo reducido se encuentra aproximadamente a 1,7 mm del vértice del ojo esquemático.

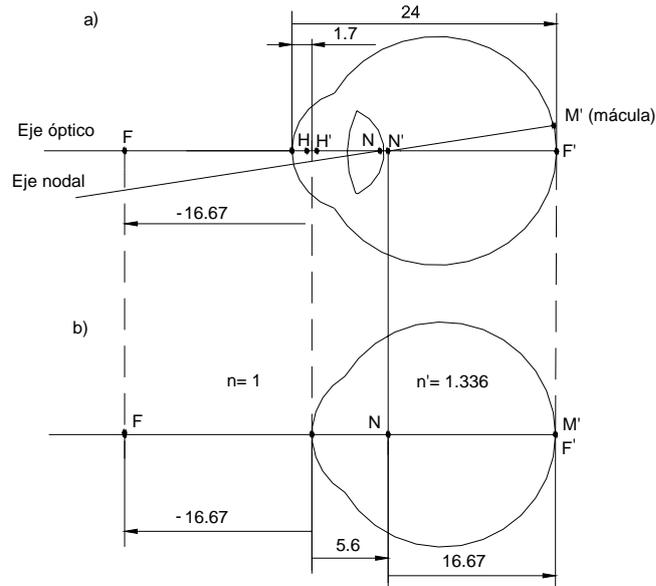


Figura 1.17. Comparación del ojo esquemático con el ojo reducido.

En la mayoría de las ocasiones las imágenes proyectadas sobre la retina se pueden estudiar adecuadamente sobre la base del ojo reducido ya que el tamaño de la imagen retiniana no se modifica de forma importante.

1.12 LA IMAGEN RETINIANA: FORMACIÓN Y TAMAÑO

En la formación de la imagen retiniana se asume que los rayos formadores de la imagen se comportan como rayos paraxiales. El tratamiento es aplicable a ángulos pequeños solamente y se ignoran las aberraciones y la curvatura de la retina.

La *Figura 1.18* muestra un punto axial B y un punto O fuera del eje en el plano perpendicular a través de B. Los haces de rayos procedentes de cada uno de estos puntos pasan al interior del ojo a través de la córnea, iris y cristalino, y forman la imagen en B' y O' respectivamente sobre la retina. Todos los rayos

en cada haz concurren en el mismo punto. De acuerdo con las reglas de la óptica paraxial, el punto O' se encuentra en el plano que pasa a través de B' y perpendicular al eje óptico.

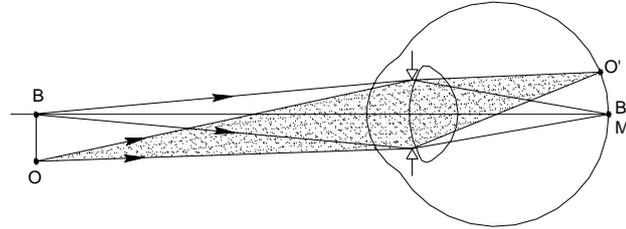


Figura 1.18. Caso general de formación de la imagen retiniana y de los haces formadores de la imagen.

Los puntos B y O están en los bordes de un objeto, y B' y O' están en los bordes de la imagen correspondiente. Se deduce que la imagen retiniana es invertida tanto en la dirección horizontal como en la vertical y que es más pequeña que el objeto. Posteriormente, un nuevo proceso de inversión ocurre en el cerebro para mantener una percepción adecuada.

Es necesario hacer la distinción entre imagen retiniana e imagen óptica. La *imagen retiniana* es la que se forma sobre la retina, la cual puede estar enfocada o desenfocada dependiendo de las circunstancias, y la *imagen óptica* es la imagen nítida que formaría el sistema refractivo del ojo suponiendo que no estuviese la retina. El miope que observa un objeto lejano sin compensación óptica verá una imagen borrosa. Las dos imágenes óptica y retiniana solamente coincidirán cuando la imagen retiniana esté enfocada

La imagen formada por una sola superficie refractiva, tal como ocurre en el ojo reducido, se puede hallar mediante la construcción de dos o más trayectorias de rayos desde un punto objeto dado. Las trayectorias de rayos más comunes en estas construcciones se muestran en la *Figura 1.19*, en la que BO es un objeto para el ojo. El punto imagen O' es la intersección de cualquier par (o más) de los siguientes rayos refractados originados desde O : 1) rayo incidente paralelo al eje óptico que pasa a través de F'_o después de refractarse; 2) rayo

que pasa por el foco objeto y emerge después de la refracción paralelo al eje; 3) rayo nodal que pasa por el punto nodal o centro de curvatura y por lo tanto, no se desvía; 4) rayo pupilar paraxial (también rayo principal paraxial) dirigido hacia el centro de la pupila de entrada y que en ojo reducido coincide con el punto principal H. De éstos, los rayos paraxiales más importantes a considerar son el rayo nodal y el rayo pupilar o principal.

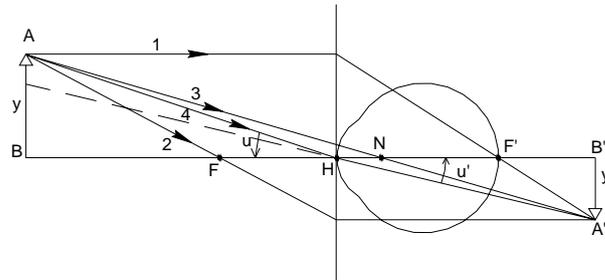


Figura 1.19. Construcción gráfica de la imagen óptica de un objeto en el ojo reducido.

La posición y el tamaño de la imagen óptica se pueden determinar teniendo en cuenta que en una superficie refractiva esférica la *potencia F* viene dada por la relación:

$$F = \frac{n'}{f'} = -\frac{n}{f} = \frac{n'-n}{r} = \frac{n'}{s'} - \frac{n}{s}$$

En este contexto es más fácil trabajar en términos de *vergenza*, que se usan para designar la inversa de una distancia objeto o imagen (en metros) multiplicada por el índice de refracción del medio correspondiente. Al igual que la potencia focal, su unidad es la dioptría. Así,

$$\text{Vergencia objeto } S = \frac{n}{s}$$

$$\text{Vergencia imagen } S' = \frac{n'}{s'}$$

Por lo tanto,

$$F = S' - S \qquad S' = S + F$$

Las vergencias S y S' también se llaman distancias dióptricas.

Asimismo, el aumento transversal se puede expresar mediante las vergencias de la siguiente manera:

$$B' = \frac{y'}{y} = \frac{n \cdot s'}{s \cdot n'} = \frac{S}{S'}$$

Por consiguiente, el tamaño de la imagen óptica y' es

$$y' = y \cdot \frac{S}{S'}$$

Ejemplo:

Un ojo reducido emétrope estándar mira (sin acomodar) un objeto de 100 mm de alto situado en su eje óptico a una distancia de 333 mm de su punto principal. ¿Cuál es la posición y tamaño de su imagen óptica?

$$F_o = +60,00 \text{ D (potencia del ojo reducido emétrope estándar)}$$

$$s = -333 \text{ mm}$$

$$S = \frac{1000}{-333} = -3,00 \text{ D}$$

$$S' = S + F_o = -3,00 + 60 = +57 \text{ D}$$

$$S' = \frac{n'}{s'} = \frac{1,336}{s'} = +57 \text{ D}$$

Posición

$$s' = \frac{1000 \cdot 1,336}{+57} = +23,44 \text{ mm}$$

Tamaño

$$y' = y \cdot \frac{S}{S'} = 100 \cdot \frac{-3,00}{+57} = -5,26 \text{ mm}$$

El signo negativo indica la inversión de la imagen. En este ejemplo, la imagen óptica se encontraría teóricamente detrás de la retina, ya que la distancia imagen (23,44 mm) es mayor que la longitud axial del ojo reducido (22,27 mm). La imagen retiniana es borrosa debido a que el ojo no ha modificado su potencia, mediante la acomodación, para enfocar a esa distancia próxima.

1.12.1 Ojo enfocado al infinito

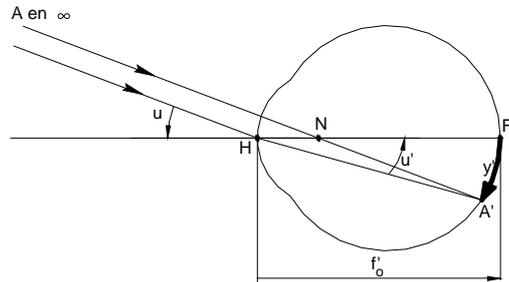


Figura 1.20. Construcción gráfica de la imagen de un objeto lejano en el ojo reducido.

La imagen de un objeto situado en el infinito se forma en el plano focal imagen y su tamaño depende del ángulo subtendido por el objeto. En la *Figura 1.20* un rayo procedente del extremo de un objeto A incide en el punto principal H formando un ángulo u con el eje óptico. El rayo se refracta y desvía hacia el eje, formando un ángulo u' con él. Por trigonometría el tamaño de la imagen y' se obtiene de,

$$y' = -f' \tan u'$$

En esta expresión se ha introducido el signo negativo para satisfacer el convenio de signos ya que f' y $\tan u'$ son positivos pero y' es invertida y debe tener un valor negativo.

Para ángulos pequeños se puede aproximar que $\sin u \approx \tan u$, y de acuerdo con la ley de la refracción

$$n \sin u = n' \sin u'$$

En este caso n es el índice de refracción del aire, y como el ángulo u es muy pequeño la última expresión se puede poner en la forma paraxial más simple

$$n' u' = n u = u \quad \text{o} \quad u' = \frac{u}{n'}$$

Por lo tanto: $y' = -u' \cdot f' = -u \cdot \frac{f'}{n'}$

como $\frac{n'}{f'} = F_o$

Tenemos: $y' = -\frac{u}{F_o}$;

En esta expresión y' está en metros, u en radianes y F en dioptrías.

Ejemplo:

Un objeto de 3 m de altura es visto por un ojo con una potencia equivalente de +62D a 20 metros de distancia. ¿Cuál es la posición y el tamaño de la imagen óptica?

$$s' = f' = \frac{n'}{F_o} = \frac{1,336}{62} = 0,0215 \text{ m} = 21,5 \text{ mm}$$

$$\text{tg } u = \frac{3}{20} = 0,15 \approx u = 0,15 \text{ rad}$$

$$y' = -\frac{u}{F_o} \quad y' = -0,15 \cdot \frac{1000}{62} = -2,42 \text{ mm}$$

2 LAS AMETROPIAS ESFÉRICAS

Las dimensiones de los componentes ópticos del sistema ocular tienen una gran variabilidad, por ello la imagen elaborada por este sistema no siempre se encuentra enfocada sobre la retina. Generalmente se asume que un ojo normal debería estar enfocado al infinito cuando la acomodación está relajada. Este ojo se denomina emétrepe. Así, *emetropía* significa etimológicamente "ojo dentro de la medida". En este ojo, los rayos paralelos de luz procedentes de un objeto lejano se refractan y convergen sobre la retina, permitiendo que los objetos lejanos se vean nítidamente ya que el punto focal imagen F' coincide con la fovea (M').

Ametropía significa "ojo fuera de la medida". En este caso, estando la acomodación relajada, los rayos paralelos de luz procedentes del infinito no se enfocan sobre la retina, sino en un foco F' por delante o por detrás de ella. Se dice que los ojos amétropes tienen un error de refracción, ya que la causa es un defecto óptico y no un defecto funcional. El error refractivo se puede considerar como un error en la potencia debido a un desajuste entre la potencia equivalente y la longitud del ojo. Por ejemplo, si la potencia equivalente es demasiado alta para una determinada longitud del ojo, la imagen se forma delante de la retina y esto resulta en un error refractivo miópico. Si la potencia es demasiado baja con relación a la longitud del ojo, la imagen se forma detrás de la retina y resulta en un error refractivo hipermetrópico.

2.1 CLASIFICACIÓN DE LAS AMETROPÍAS

Las ametropías se dividen en dos categorías principales: ametropías esféricas y astigmatismo. En las *ametropías esféricas* el sistema refractivo del ojo es simétrico alrededor de su eje óptico y el error refractivo es el mismo en todos los meridianos. El ojo es capaz de formar una imagen nítida de un punto objeto lejano sobre su foco imagen. Sin embargo, como éste no coincide con la fovea la imagen del punto sobre la retina será un punto desenfocado (círculo de difusión) que tendrá unas dimensiones tanto mayores cuanto mayor sea la distancia que separa la retina del foco imagen. Cuando el foco imagen del sistema óptico del ojo se encuentra detrás de la retina el proceso se llama *hipermetropía* y cuando el foco imagen (F') está delante de la retina, el proceso se denomina *miopía*. En el *astigmatismo* la potencia refractiva del ojo varía en los diferentes meridianos, los rayos procedentes de un mismo punto objeto no van a reunirse en un mismo foco, sino en focos diferentes según el meridiano del ojo que atraviesen.

2.2 LA MIOPIA

Miopía viene del griego que significa cerrar, guiñar los ojos, ya que el miope ve mejor estrechando la apertura palpebral para conseguir una hendidura estenopeica que incremente la profundidad de foco.

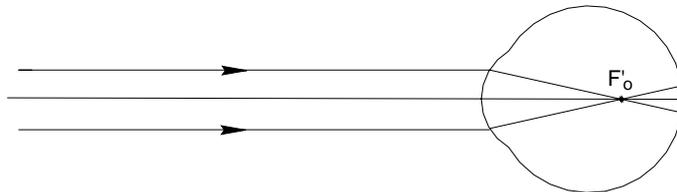


Figura 2.1. Posición del foco imagen en el ojo miope.

Se considera que el ojo miope tiene un exceso de potencia refractiva para su longitud axial, ya que ésta es demasiado larga en relación con la distancia focal imagen (*Figura 2.1*). Los rayos paralelos de luz procedentes del infinito,

después de atravesar los medios de refracción del ojo, forman su imagen nítida en un foco F' delante de la retina, de modo que la imagen que se forma sobre ésta se constituye por círculos de difusión producidos por el haz divergente. Se deduce que los objetos lejanos no pueden verse claramente. Para que los rayos puedan enfocar en la retina deben llegar divergentes, es decir, el objeto debe estar situado a una distancia finita del ojo.

2.2.1 El punto remoto de visión nítida

El punto conjugado con la fovea del ojo sin acomodar se llama punto remoto (M_r) y la distancia desde el punto principal del ojo hasta el punto remoto se denomina distancia del punto remoto (r). En el ojo emétrepe, los rayos que emergen del ojo, procedentes de la fovea salen paralelos por lo que su punto remoto está en el infinito. Sin embargo, en el ojo miope los rayos emergentes de la fovea salen del ojo con una vergencia tal que convergen en un punto situado en el eje óptico por delante del ojo, es decir, en el punto remoto conjugado de la fovea. Éste es el punto más lejano de visión nítida del ojo miope estando la acomodación en reposo. Por lo tanto, el punto remoto en la miopía es real y está situado delante del ojo a una distancia finita proporcional al defecto del sujeto (*Figura 2.2*). Es decir, cuanto mayor sea la miopía menor será la distancia del punto remoto.

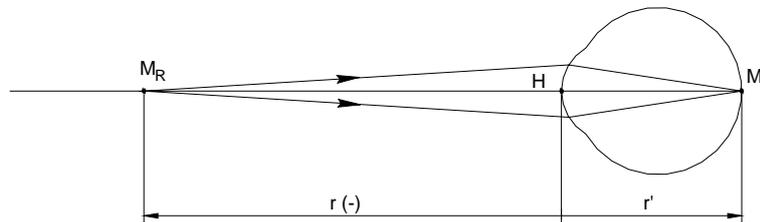


Figura 2.2. Posición del punto remoto en el ojo miope sin acomodar (r tiene signo negativo).

Por medio de un esfuerzo de acomodación, un miope puede enfocar objetos situados a distancias más cortas que el punto remoto, pero no los

objetos que están a distancias más lejanas. La visión a tales distancias podría, por el contrario, empeorar con la acomodación ya que aumentaría el poder refractivo y daría lugar a mayor miopía y a una imagen más borrosa. Por lo tanto, el miope sin corregir tiene muy limitada la zona de visión nítida, de ahí la expresión popular “corto de vista”. Sin embargo, dado que puede enfocar objetos a distancias más cortas de lo habitual, puede conseguir imágenes retinianas más grandes y en consecuencia distinguir mejor los detalles.

2.3 LA HIPERMETROPÍA

La hipermetropía es un error de refracción o la condición óptica de un ojo sin acomodar donde los rayos paralelos de luz son interceptados por la retina antes de alcanzar su foco imagen situado detrás de ella (*Figura 2.3*). En la retina se forman círculos de difusión que producen una imagen borrosa, mientras que en F' se formaría la imagen nítida del objeto situado en el infinito si no estuviese la retina. El ojo hipermetrope es relativamente poco potente para su longitud axial, demasiado corta con relación a la distancia focal imagen.

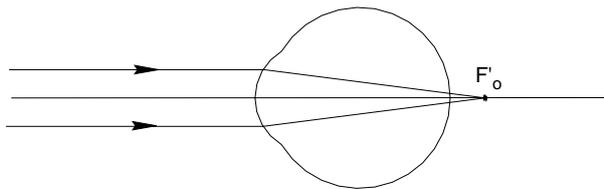


Figura 2.3. Posición del foco imagen en el ojo hipermetrope.

2.3.1 El punto remoto de visión nítida

En el ojo hipermetrope los rayos procedentes de un punto de la retina emergen divergentes, por lo que el punto remoto (punto conjugado de la fovea en el ojo desacomodado) no existe como objeto real, pero se puede determinar prolongando "virtualmente" los rayos emergentes en sentido contrario (*Figura*

2.4). Por lo tanto, el punto remoto del hipermetrope es virtual y está situado detrás del ojo.

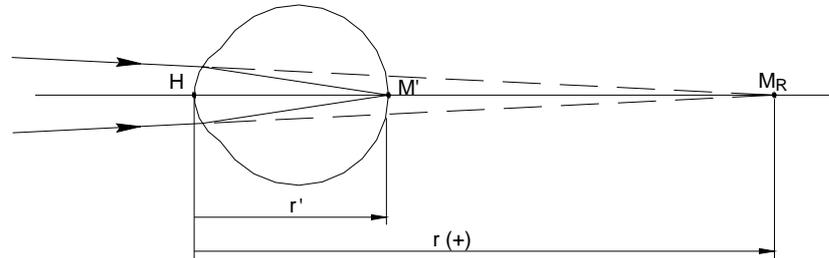


Figura 2.4. Posición del punto remoto en el ojo hipermetrope sin acomodar.

Puesto que el ojo hipermetrope solo puede enfocar sobre la retina la luz que llega con cierta convergencia no podrá ver nítidamente un objeto real situado a cualquier distancia. Sin embargo, mediante un esfuerzo de acomodación puede aumentar el deficiente poder convergente de su sistema óptico y ver claramente los objetos lejanos. El adulto hipermetrope joven dispone de suficiente acomodación para hacer esto de forma inconsciente, y si su visión es normal puede que incluso no sospeche la presencia del error refractivo.

2.4 REFRACCIÓN OCULAR (**R**) O GRADO DE AMETROPIA

La cantidad de ametropía o refracción ocular se designa con el símbolo R y es la inversa de la distancia del punto remoto (r) en metros. Por ejemplo, si el punto remoto de un miope está a 333 mm del punto principal del ojo, entonces

$$r = - 333 \text{ mm}$$

y la refracción ocular es,

$$R = n/r = 1/-333 \cdot 10^{-3} = -3,00 \text{ D}$$

En el ojo reducido, como los puntos principales del ojo coinciden en el vértice de la córnea, la distancia r se mide desde la superficie reducida hasta M_r . En la *Figura 2.5* M_r es el punto objeto y M' el punto imagen en la fovea por refracción en la superficie reducida. En el caso particular del punto remoto HM_r es una distancia objeto, pero una bastante especial ya que r es constante para cada ojo. Cualquier otra distancia objeto que no sea ésta se designa con el símbolo s . Sí r es la distancia objeto para la refracción en el ojo sin acomodar entonces, r' es la distancia imagen medida desde el punto principal imagen. En el caso del ojo reducido r' coincide con la longitud axial que se mide desde H hasta M' y por lo tanto es una distancia positiva.

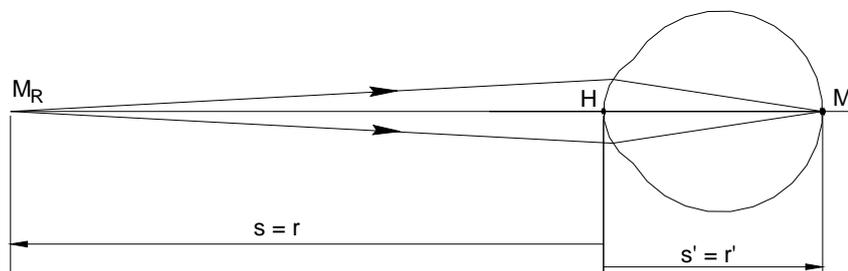


Figura 2.5. En este ojo en estado relajado, la distancia desde la superficie reducida hasta el punto remoto es una distancia objeto especial denominada r . La longitud axial es por lo tanto una distancia imagen r' .

R es la vergencia incidente en la superficie reducida del ojo, necesaria para que se forme una imagen nítida en la mácula M' del ojo desacomodado. También se puede considerar como la potencia de una lente que se situase en contacto con la superficie reducida para compensar al ojo amétrope.

R' es la vergencia imagen necesaria para tener imágenes retinianas nítidas. También se puede llamar “longitud dióptrica del ojo reducido” y se obtiene de

$$R' = n'/r' \quad (r' \text{ en metros})$$

En el ojo reducido

$$S' = S + F_o$$

siendo S' y S las vergencias imagen y objeto respectivamente. Para obtener una imagen retiniana nítida se debe cumplir que $S' = R'$ y que el objeto esté situado en el punto remoto, tal que $s = r$ y $S = R$. Cuando estos valores especiales de S y S' se sustituyen en la expresión anterior se obtiene la fórmula de la refracción ocular:

$$R' = R + F_o \quad \text{o} \quad R = R' - F_o$$

Es decir, la refracción ocular es igual a la longitud dióptrica del ojo reducido menos su potencia. En el ojo miope el valor de R es negativo y en el hipermetrope es positivo. En el ojo emétrope $R = 0$ ya que el punto remoto está en el infinito y por lo tanto $R' = F_o$

Ejemplo:

Un ojo reducido tiene una longitud axial de 22 mm y una potencia de +62,00 D. ¿Cuál es su refracción ocular y donde está situado su punto remoto?

$$F_o = +62,00 \text{ D y}$$

$$R' = n'/r' = \frac{1,336 \cdot 1000}{+22} = +60,00 \text{ D}$$

La refracción ocular o error refractivo es

$$R = R' - F_o = 60 - 62 = -2,00 \text{ D (miopía)}$$

La posición del punto remoto se obtiene de

$$r = 1/R = 1000 / -2,00 = -500 \text{ mm}$$

2.5 CAUSAS DE LAS AMETROPÍAS ESFÉRICAS

Generalmente, las causas más importantes que dan lugar a la aparición de anomalías refractivas son alteraciones en: la longitud axial, la curvatura de las superficies refractivas y en los índices de refracción, pudiendo intervenir en la génesis de las ametropías esféricas uno o varios de los factores.

Mientras que la emetropía resulta de la coordinación completa de la longitud axial y los otros componentes ópticos del ojo, las ametropías hasta $\pm 4,00$ D se deben considerar resultado de una coordinación imperfecta de los valores normales de los diferentes componentes. Dentro de estos límites de ametropía, los miopes tienden a tener longitudes axiales más largas y mayores potencias corneales que los emétropes, mientras que lo contrario se ha demostrado para los hipermétropes. Sin embargo, puede ocurrir que un ojo miope tenga una longitud axial más corta que uno hipermetrope, lo cual demuestra la imposibilidad de considerar la hipermetropía y la miopía como dos procesos distintos

Si solo se produjese una variación en la longitud axial, permaneciendo los demás componentes oculares estables, un cambio en los valores de $\Delta r'$ de aproximadamente ± 1 mm produciría un cambio en el valor de la ametropía de

$$\Delta R \approx -2,7 \Delta r' \text{ (r' en mm)}$$

Para valores de $\Delta r' = +3$ mm, el coeficiente sería -2,4, mientras que para $\Delta r' = -3$ mm sería -3,1.

Inversamente $\Delta r' \approx -\Delta R / 2,7 = -0,37 \Delta R$. Así, una variación de 0,37 mm en la longitud axial alteraría el estado refractivo en una dioptría.

En el caso de que solo variase la potencia de la córnea, al ser ésta el último elemento refractivo atravesado por un haz de rayos emergente desde la retina, un cambio ΔF_C en su potencia resultaría en un cambio igual pero opuesto en la ametropía o refracción ocular. Expresado matemáticamente,

$$\Delta R = -\Delta F_C$$

Así, el aumento de una dioptría en la potencia de la córnea produciría una dioptría de miopía.

En las ametropías de hasta ± 4 D, la lente del cristalino se correlaciona bien con la longitud axial y no es por lo tanto el factor causativo de la anomalía, y si lo es sin embargo un fallo en la correlación entre la potencia de la córnea y la longitud axial. En las ametropías superiores a ± 4 D la longitud axial es la principal causa del error refractivo.

Normalmente, en el ojo reducido se distingue entre ametropía *axial* y ametropía *refractiva* debido a su utilidad didáctica en el estudio del sistema óptico ocular. En la *ametropía axial* se considera que el ojo tiene una potencia estándar de +60,00 D, y la causa de la anomalía se atribuye a un “error” en la longitud axial. En la *ametropía refractiva*, se considera que la longitud axial del ojo reducido tiene un valor estándar de 22,27 mm, y el defecto se atribuye a un “error” en la potencia, que puede ser debido a la curvatura de las superficies o a los índices de refracción. Sin embargo, la distinción entre ametropía axial y refractiva carece de fundamento real.

2.5.1 La hipermetropía

La hipermetropía es la más frecuente de todas las anomalías de refracción y constituye una etapa del desarrollo normal. El 75% de los recién nacidos son hipermétropes en un grado de +2,50 a +2,75 D y a medida que progresa su desarrollo corporal el eje antero posterior se alarga, de modo que una vez pasada la adolescencia, la mayoría de los ojos son emétopes. En más del 50% de la población no se alcanza la emetropía persistiendo cierto grado de hipermetropía fisiológica. Si el proceso de alargamiento continúa el ojo se hace miope.

Las causas de la hipermetropía y sus tipos estructurales, asumiendo que solo varía un parámetro, son:

a) Un eje antero posterior demasiado corto con relación a una potencia refractiva normal. El grado de acortamiento no es grande y casi nunca sobrepasa los 2 mm. Cada milímetro de disminución representa aproximadamente 3,00 D, de modo que una hipermetropía de +6,00 D es

poco frecuente. Este tipo de hipermetropía se conoce como *hipermetropía axial* y algunas veces se asociada con ojos pequeños donde no solo el diámetro antero posterior es pequeño sino que también lo es la córnea.

En el ojo reducido hipermetrope axial la longitud axial es menor de 22,27 mm ($r'_h < r'_e$) pero la potencia es la misma que en el ojo reducido emétrope $F_o = +60,00$ D y $n' = 1,336$.

Por ejemplo, en el caso de un ojo hipermetrope axial con una longitud axial (r') de +21,75 mm, la potencia del ojo es de +60,00 D y su focal imagen es,

$$f'_o = \frac{1,336 \cdot 1000}{+60} = +22,7 \text{ mm}$$

Por lo tanto la longitud axial es menor que la distancia focal imagen.

La longitud dióptrica es:

$$R' = \frac{1,336 \cdot 1000}{+21,75} = +61,42 \text{ D}$$

La refracción o ametropía ocular:

$$R = R' - F_o = +61,42 - (+60) = +1,42 \text{ D}$$

La distancia del remoto

$$r = 100 / +1,42 = +70,42 \text{ cm}$$

b) Una menor curvatura de las superficies refractivas. En este caso la hipermetropía se denomina *hipermetropía de curvatura*. Generalmente la córnea está más aplanada, puede estarlo congénitamente o como resultado de un traumatismo o enfermedad. El aumento de 1mm en el radio de curvatura produce aproximadamente una hipermetropía de +6,00 D. En estos defectos

elevados es raro que la curvatura siga siendo esférica y generalmente se produce astigmatismo.

c) Una alteración de algún índice de refracción. Generalmente disminuye el índice de la lente del cristalino y por lo tanto su potencia refractiva. Ésta es la causa de la hipermetropía que tiene lugar fisiológicamente en la edad madura y de la hipermetropía que se presenta de modo patológico en diabéticos bajo tratamiento. Se conoce como *hipermetropía de índice*.

Las hipermetropías de curvatura y de índice constituyen las *hipermetropías refractivas*.

En el ojo reducido hipermetrope refractivo la longitud axial es la misma que en el ojo reducido emétrope ($r'_h = r'_e$) pero la potencia es menor $F_o < +60$ D.

Por ejemplo, en el caso de una hipermetropía refractiva de refracción ocular

$$R = +1,25 \text{ D,}$$

la longitud axial es

$$r' = 22,27 \text{ mm}$$

$$R' = \frac{1,336 \cdot 1000}{22,27} = +60,00 \text{ D}$$

La potencia del ojo hipermetrope es

$$F_o = R' - R = 60,00 - (+1,25) = +58,75 \text{ D}$$

La distancia del remoto:

$$r = 1/R = 100 / +1,25 = +80,00 \text{ cm}$$

d) Una alteración en la posición del cristalino. Su desplazamiento hacia atrás produce hipermetropía.

e) Ausencia del cristalino, generalmente como resultado de su extracción quirúrgica por causa de una catarata, es decir cuando en el cristalino se han desarrollado opacidades, debido a la edad, que impiden una buena visión. En este caso se produce una hipermetropía acusada que se conoce con el nombre de *afaquia*.

2.5.2 La miopía

La miopía se puede clasificar según la causa del mismo modo que en la anomalía refractiva precedente:

a) En la *miopía axial* el eje antero posterior del ojo es demasiado largo. El poder refractivo del ojo es normal, la curvatura de la córnea y del cristalino también es normal y el cristalino está en la posición correcta. Sin embargo, en la miopía axial típica la curvatura de la córnea tiende a ser más plana de lo normal debido al proceso de coordinación dirigido a evitar una anomalía aún mayor y, en general, el cristalino también se aplana como si tendiera a corregir el error. El ojo miope axial generalmente es más grande que el emétrope, incluso el segmento anterior también lo es. En la gran mayoría de los casos y desde luego en las formas intensas, la miopía es axial.

Fundamentalmente existen dos tipos de este proceso:

- La miopía simple o leve; resulta de la variación fisiológica de los diferentes elementos ópticos que condicionan la refracción del ojo. Esta miopía no progresa más allá de la magnitud impuesta por el desarrollo normal y se acompaña de una visión normal, sin requerir otro tratamiento que su compensación óptica.

- La miopía patológica, menos frecuente, son los casos intensos de naturaleza más grave, originados por variaciones anormales del desarrollo de los componentes ópticos del ojo, sobre todo de la longitud axial. Esta miopía patológica puede aumentar progresivamente hasta un grado en que merece consideración como entidad clínica individual.

En el ojo reducido miope axial la potencia es la misma que en el ojo reducido emétrope ($F_o = +60,00$ D) pero la longitud axial es mayor de 22,27 mm ($r'_m > r'_e$).

Por ejemplo, en el caso de una miopía axial con una longitud axial (r') de +23,2 mm, si la potencia del ojo es de +60,00 D, la focal imagen es,

$$f' = \frac{1,336 \cdot 1000}{+60,00} = +22,27 \text{ mm}$$

Por lo tanto la longitud axial es mayor que la distancia focal imagen.

La longitud dióptrica es

$$R' = \frac{1,336 \cdot 1000}{23,2} = +57,58 \text{ D}$$

La refracción ocular es

$$R = R' - F_o = +57,58 - (+60) = -2,41 \text{ D}$$

La distancia del remoto es

$$r = 100 / -2,41 = -41,5 \text{ cm}$$

b) Un exceso de curvatura de la córnea, o de una o ambas superficies de la lente del cristalino da lugar a la *miopía de curvatura*.

En lo referente a la córnea son frecuentes las pequeñas desviaciones de lo normal, que pueden ser de importancia notable, dado que una disminución de 1mm en el radio de curvatura produciría una miopía de -6,00 D. Los casos pronunciados de aumento verdadero de la curvatura corneal solo aparecen en situaciones patológicas, poco frecuentes, como la córnea cónica.

Un aumento señalado de la curvatura del cristalino también es raro, aunque existen casos de lenticono anterior y posterior que pueden originar una miopía intensa.

c) En la *miopía de índice* la causa es una alteración del índice de refracción. La del humor acuoso o del humor vítreo no suele ser tan marcada como para producir un efecto apreciable. Pero las alteraciones del índice de refracción del cristalino sí pueden producir miopía. Esto es así en las cataratas incipientes y en diabéticos con hiperglucemia donde hay un aumento del índice de refracción.

La miopía de curvatura y la miopía de índice se conocen como *miopías refractivas*.

En el ojo reducido miope refractivo la longitud axial es la misma que en el ojo reducido emétrope ($r'_m = r'_e$), pero la potencia es mayor

$$F_o > +60,00 \text{ D.}$$

Por ejemplo, en el caso de una miopía refractiva de refracción ocular $R = -2,50 \text{ D}$, la longitud axial (r') es $22,27 \text{ mm}$

$$R' = \frac{1,336 \cdot 1000}{22,27} = +60,00 \text{ D}$$

La potencia del ojo miope es

$$F_o = R' - R = +60,00 - (-2,50) = +62,50 \text{ D}$$

La distancia del remoto es

$$r = 1/R = 100 / -2,50 = -40,00 \text{ cm}$$

d) Un desplazamiento del cristalino hacia delante también produce miopía.

2.6 IMÁGENES RETINIANAS BORROSAS

Generalmente, el objeto no está situado en el plano del punto remoto y por lo tanto su imagen óptica no se forma sobre la retina, es decir la vergencia imagen S' no es igual a R' (longitud dióptrica del ojo reducido). La imagen retiniana del objeto será borrosa y estará compuesta de círculos de difusión superpuestos, cada uno de los cuales corresponde a un punto de la imagen óptica nítida.

2.6.1 Objeto puntual: diámetro del círculo de difusión

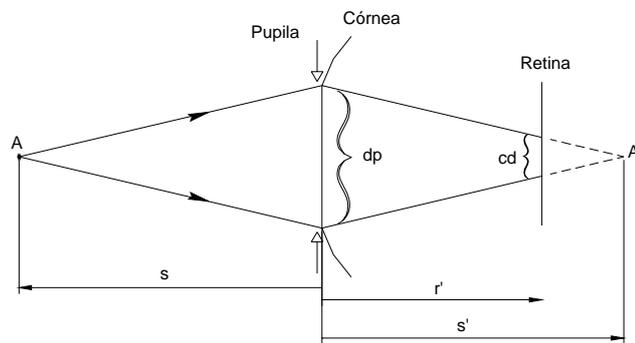


Figura 2.6. Formación del círculo de difusión en el ojo amétrope.

El tamaño de cada círculo de difusión está relacionado con el tamaño de la pupila y con el grado del error de enfoque, cuanto mayor sea la distancia que separa la retina del foco imagen, mayor será el tamaño del círculo de difusión. La *Figura 2.6* muestra un ojo reducido y un pincel de rayos procedente de un punto objeto axial A que converge hacia el punto imagen A' , siendo d_p el diámetro de la pupila y cd el diámetro del círculo de difusión. Para ángulos pequeños, los rayos marginales del pincel forman en el ojo triángulos aproximadamente similares, de tal manera que

$$\frac{cd}{d_p} = \frac{(s'-r')}{s'}$$

así

$$cd = d_p \cdot \left(\frac{s'-r'}{s'} \right)$$

Si se sustituyen las distancias s' y r' , que generalmente difieren en una cantidad muy pequeña, por sus vergencias correspondientes, se obtiene una fórmula más adecuada

$$cd = d_p \frac{\frac{n'}{S'} - \frac{n'}{R'}}{\frac{n'}{S'}} = d_p \frac{R'-S'}{R'}$$

Teniendo en cuenta que $R' = R + F_o$ y que $S' = S + F_o$, la ecuación anterior se puede transformar en

$$cd = d_p \frac{R-S}{R'}$$

Estas fórmulas se pueden aplicar tanto si el punto imagen A' se encuentra detrás de la retina como si está delante de ella. En este último caso, el diámetro del círculo de difusión resulta negativo, indicando que los rayos se cruzan antes de llegar a la retina pero no tiene un significado real.

La cantidad $(R' - S')$ se puede considerar como el error de enfoque E en dioptrías. En visión lejana, con el objeto en el infinito $S = 0$ y $S' = F_o$, sustituyendo estos valores se obtiene que el error de enfoque es

$$R' - F_o = R,$$

en cuyo caso

$$cd = d_p \cdot \frac{R}{R'}$$

Los sujetos con ametropías elevadas tendrán mayores diámetros del círculo de difusión, y consecuentemente mayor borrosidad.

En el ojo emétrope, $R = 0$, de tal manera que $R' = F_o$ y por lo tanto,

$$cd = d_p \cdot \frac{S}{F_o} \qquad cd = \frac{d_p}{s \cdot F_o}$$

Ejemplo:

Un ojo miope de refracción ocular -5,00 D con un diámetro pupilar de 4 mm tiene una potencia de +63,00 D ¿Calcular el diámetro del círculo de difusión cuando mira un punto objeto situado a una distancia de 330 mm sin acomodar?

$$s = -330 \text{ mm} \qquad S = 1000 / -330 = -3,00 \text{ D}$$

$$R = -5,00 \text{ D}$$

$$F_o = +63,00 \text{ D}$$

$$cd = d_p \cdot \left(\frac{R - S}{R'} \right)$$

$$R' = R + F_o = -5,00 + 63,00 = +58,00 \text{ D}$$

$$cd = 4 \cdot \left[\frac{-5,00 - (-3,00)}{+58,00} \right] = -0,138 \text{ mm}$$

2.6.2 Agujero estenopeico

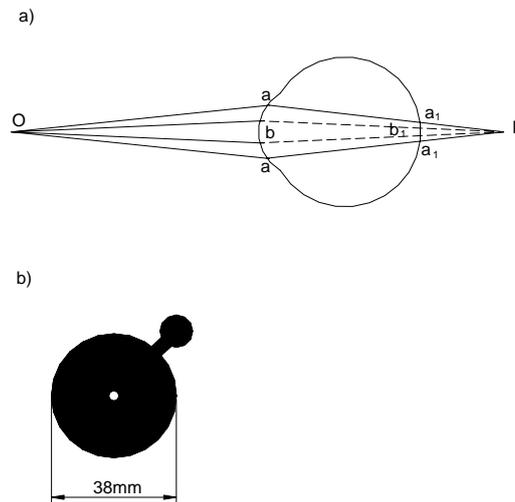


Figura 2.7. a) Cuando la pupila se contrae desde el tamaño aa al b , el círculo de difusión formado por la imagen de O se reducirá de a_1a_1 a b_1 y en consecuencia, la imagen mejorará. b) Agujero estenopeico (pupila artificial) para reducir el tamaño de los círculos de difusión que podrían presentarse debido a un error refractivo sin compensar.

El tamaño del círculo de difusión y el diámetro pupilar están directamente relacionados; cuanto menor sea el tamaño de la pupila menor será la borrosidad de la imagen retiniana ya que los círculos de difusión disminuirán (Figura 2.7 a). Teóricamente, si la pupila se redujera a un punto, solo podría penetrar un rayo, se estimularía un solo cono y en todos los casos se formaría una imagen nítida, independientemente del error que pudiera existir.

Este principio se aplica en el examen clínico del estado refractivo situando delante del ojo amétrope sin compensar o parcialmente compensado, con una imagen retiniana borrosa, una pupila artificial o agujero estenopeico (*Figura 2.7 b*). Éste es un disco opaco con un agujero en el centro de un 1 mm de diámetro, por el que solo pasa un pequeño haz de rayos que sigue el eje del sistema óptico, de modo que no se ve afectado por éste y el tamaño de los círculos de difusión sobre la retina se reduce, de tal manera el sujeto presentará una aparente mejoría de la visión. En este caso la prueba indica que es necesario mejorar la compensación óptica. Sin embargo, si con el agujero estenopeico la agudeza visual no mejora el defecto no sería óptico sino posiblemente una lesión funcional del sistema visual.

La pupila, por lo tanto, desempeña un importante papel en la formación de la imagen retiniana, cuanto más pequeño sea su diámetro más nítida será la imagen que se proyecta sobre la retina. Los sujetos con pupilas más pequeñas que el diámetro medio, por ejemplo 2 mm, serán capaces de tolerar la borrosidad mejor que aquellos con pupilas mayores. Esto significa que algunos sujetos con una miopía pequeña pero pupilas grandes, pueden experimentar una visión de los objetos lejanos considerablemente más borrosa que aquellos sujetos con ametropías mayores pero con pupilas más pequeñas.

Por otra parte, con un diámetro pupilar pequeño se reduce la cantidad de luz que entra en el ojo y se produce más difracción. Debido a la naturaleza de la luz la mejor imagen de una fuente puntual es un disco de Airy de tamaño finito. El disco de Airy no se debe confundir con el círculo de difusión originado por las condiciones de desenfoque y su efecto sobre la distribución de la luz en la imagen retiniana no se debe pasar por alto, especialmente cuando el círculo de difusión es relativamente pequeño.

2.6.3 Objeto extenso

2.6.3.1 Tamaño de la imagen retiniana básica

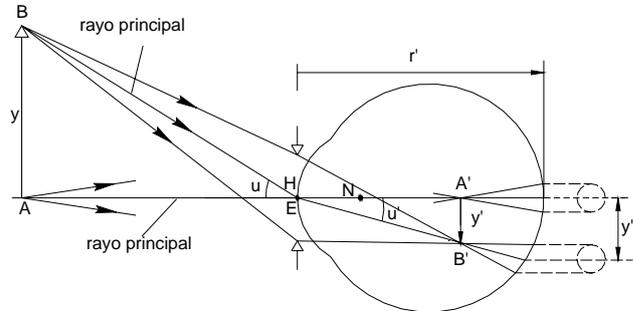


Figura 2.8. Tamaño básico de la imagen retiniana y'_b de un objeto extenso desenfocado determinado por el rayo principal.

La *Figura 2.8* representa la formación de la imagen retiniana de un objeto BA situado sobre el eje de un ojo reducido miope. En cada pincel de rayos procedente del extremo superior e inferior del objeto el rayo dirigido hacia el centro de la pupila de entrada se conoce como el *rayo pupilar o principal* del pincel incidente. En el ojo reducido, cualquier rayo que pase a través del centro de la superficie reducida será un rayo principal, ya que en esa posición se localiza el centro de la pupila que además coincide con el punto principal H. La trayectoria de este rayo pupilar o principal es la más importante para el estudio de las imágenes retinianas borrosas. Los rayos procedentes de los extremos superior e inferior del objeto después de enfocar delante de la retina en B'A', la imagen óptica nítida, continúan su trayectoria hasta formar círculos de difusión luminosos sobre la retina. El centro de cada uno de estos círculos de difusión está determinado por la intersección del rayo principal con la retina, y aunque la acomodación o el cambio del tamaño pupilar no afectan a este rayo, si el tamaño del círculo de difusión se alterase por cualquiera o ambas de estas causas, su centro no se desplazaría. Por lo tanto, el *tamaño básico* y'_b de la

imagen retiniana desenfocada se define como la distancia sobre la retina entre los centros de los círculos de difusión limitantes.

De la *Figura 2.8* se deduce que:

$$y'_b = -u' \cdot r' = -u \cdot \frac{r'}{n'} = -\frac{u}{R'}$$

Es decir, el tamaño básico de la imagen retiniana es directamente proporcional a la longitud axial del ojo r' y al ángulo de incidencia u del rayo principal.

En las *ametropías refractivas* la longitud axial del globo ocular no varía, es decir, la retina ocupa la misma posición que en el ojo emétrope cualquiera que sea el estado refractivo del ojo. Sin embargo, la potencia refractiva del sistema óptico del ojo varía para cada tipo de ametropía refractiva. Como se observa en la *Figura 2.9*, la potencia del sistema refractivo ocular no afecta a la relación entre el rayo principal incidente y refractado, de tal manera que el tamaño básico de la imagen retiniana es esencialmente el mismo para la miopía refractiva sin compensar, la emetropía, y la hipermetropía refractiva sin compensar.

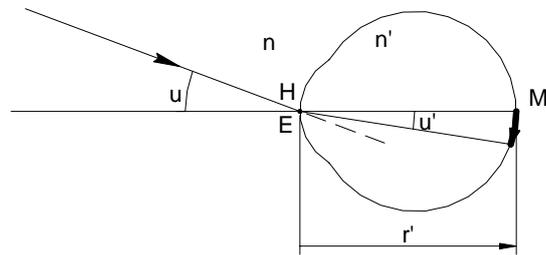


Figura 2.9. Formación de la imagen retiniana básica en el ojo amétrope refractivo.

En las *ametropías axiales* el rayo principal incidente y refractado mantienen otra vez la misma relación. Sin embargo, las imágenes retinianas básicas se forman a diferentes distancias de la superficie reducida debido a la variación en la longitud axial en estos ojos (*Figura 2.10*). Por lo tanto, para un tamaño de objeto dado ($u = \text{cte}$), el tamaño básico de la imagen retiniana será más larga en el ojo miópico y más pequeña en el ojo hipermetrónico de menor longitud axial. Es decir: $y'_H < y'_E < y'_M$.

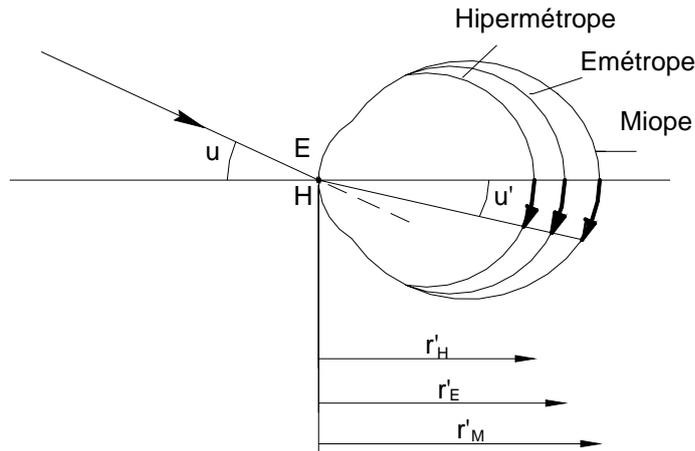


Figura 2.10. Formación de la imagen retiniana básica en los ojos amétropes axiales.

2.6.3.2 Tamaño total de la imagen borrosa

En cualquier ojo la extensión completa de la imagen borrosa sobre la retina es ligeramente más grande que el tamaño básico antes definido, al que es necesario sumar dos radios del círculo de difusión. En el caso de la imagen borrosa de una línea de espesor despreciable (*Figura 2.11*), cada punto de la imagen óptica nítida está representado por un círculo de difusión de diámetro cd . La extensión total de la imagen borrosa será la suma de y'_b más el diámetro del círculo de difusión y la anchura de la imagen será igual a cd .

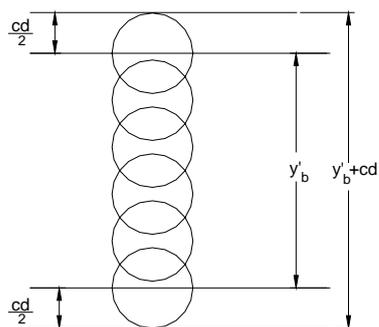


Figura 2.11. Imagen borrosa de una línea objeto.

Ejemplo:

Un ojo reducido miope de refracción ocular $-6,00$ D, potencia equivalente 60 D, con una pupila de 4 mm de diámetro, observa un objeto lejano que subtende 3° . Calcular el tamaño de la imagen retiniana borrosa.

$$R' = R + F_o = -6,00 + 60,00 = +54,00 \text{ D}$$

$$u = 3 \cdot \pi/180 = 0,05236 \text{ radianes}$$

El tamaño básico de la imagen retiniana borrosa se obtiene de

$$y'_b = -u / R' = -0,05236 / +54,00 = -0,97 \text{ mm}$$

La extensión total de la imagen borrosa es $y'_b + cd$

$$cd = d_p \cdot \frac{R}{R'} = 4 \cdot \frac{-6,00}{+54,00} = -0,444 \text{ mm}$$

$$0,97 + 0,444 = 1,414 \text{ mm}$$

En el caso de que un objeto de altura y se encuentra a una distancia s del ojo, el tamaño básico de la imagen retiniana se puede calcular teniendo en cuenta que

$$u = -\frac{y}{s} = -y \cdot S$$

Por lo tanto:

$$y'_b = y \cdot \frac{S}{R'}$$

El tamaño de la imagen óptica nítida se obtiene de la expresión:

$$y' = y \cdot \frac{S}{S'}$$

Se puede ver que si la imagen óptica se forma delante de la retina ($r' > s'$) y'_b es mayor que y' , es el caso del miope. La inversa es aplicable cuando la imagen se forma detrás de la retina, es el caso del hipermetrope.

Ejemplo:

Un objeto de 50 mm de altura está situado sobre el eje óptico de un ojo reducido emélope desacomodado a una distancia de 333 mm de su punto principal. Calcular el tamaño de la imagen retiniana borrosa para un diámetro pupilar de 3,5 mm.

$$y = 50 \text{ mm}$$

$$s = -333 \text{ mm} \quad S = 1000 / -333 = -3,00 \text{ D}$$

$$F_o = +60,00 \text{ D}$$

$$F_o = R' - R$$

En el ojo emétrope $R = 0$, por lo tanto $R' = F_O$

$$y'_b = y \frac{S}{R'} = 50 \cdot \frac{-3,00}{+60,00} = -2,5 \text{ mm}$$

$$cd = d_p \cdot \frac{S}{F_o} = 3,5 \cdot \frac{-3,00}{+60,00} = -0,175 \text{ mm}$$

$$2,5 + 0,175 = 2,675 \text{ mm}$$

2.6.4 Razón de borrosidad

El reconocimiento de la imagen borrosa de una letra depende del tamaño relativo de los círculos de difusión que componen dicha imagen. Se puede averiguar si su reconocimiento será posible a través de la razón de borrosidad (RB), que se define como:

RB = diámetro del círculo de difusión / tamaño básico de la imagen retiniana

En visión lejana, en las ametropías no compensadas

$$RB = cd / y'_b = \frac{d_p \cdot \frac{R}{R'}}{-\frac{u}{R'}} = \frac{-d_p \cdot R}{u}$$

en la que u está en miliradianes (mrad) si d_p está en milímetros.

Los experimentos han demostrado que algunos tests de letras se pueden leer cuando la razón de borrosidad es tan alta como 0,5. Cuanto menor sea la razón de borrosidad mayor será la probabilidad de que una letra borrosa se pueda reconocer. Sin embargo, se debe de tener en cuenta que la habilidad para

leer una letra borrosa o resolver el detalle de cualquier objeto, también dependerá del contraste entre el detalle y el fondo.

Para el ojo desacomodado en visión próxima, a una distancia dióptrica S , la razón de borrosidad para un objeto de altura y se obtiene de

$$RB = \frac{d_p \cdot \frac{R-S}{R'}}{y \cdot \frac{S}{R'}} = \frac{d_p \cdot (R-S)}{y \cdot S}$$

Sin embargo, si el sujeto ejerce A dioptrías de acomodación mientras observa a esa distancia próxima, el término $(R - S)$ se debe reemplazar por $(R - S - A)$.

3 COMPENSACIÓN ÓPTICA DE LAS AMETROPIAS ESFÉRICAS

El ojo en estado relajado está enfocado solamente para objetos situados en el plano de su punto remoto. Si se tiene en cuenta que el punto remoto de un ojo amétrope no está situado en el infinito, un objeto lejano no podrá formar una imagen nítida sobre la retina. Sin embargo, si mediante un sistema óptico la imagen del objeto lejano pareciese estar situada en el punto remoto del ojo, entonces esa imagen actuaría como objeto para el ojo y finalmente se formaría una imagen nítida sobre la retina.

Por lo tanto, un ojo amétrope se puede volver artificialmente emétrope si se neutraliza el defecto o exceso de refracción del ojo mediante una *lente compensadora* que añade potencia positiva en el caso de la hipermetropía y potencia negativa en el caso de la miopía. Esta potencia añadida se conoce como *compensación*. Cuando el ojo en estado relajado lleva la lente compensadora (gafa o lente de contacto) puede enfocar los objetos lejanos sobre la retina.

3.1 FUNDAMENTO DE LA COMPENSACIÓN EN VISIÓN LEJANA

Una lente compensa la visión lejana cuando forma una imagen de un objeto del infinito en el punto remoto del ojo. Esta imagen actúa ahora como objeto para el sistema óptico del ojo amétrope, que solo ve nítidamente los objetos situados en el plano de su punto remoto. Como la lente forma la imagen de los objetos lejanos en el plano de su foco imagen se deduce que para la compensación *el foco imagen de la lente compensadora debe coincidir con el punto remoto del ojo amétrope.*

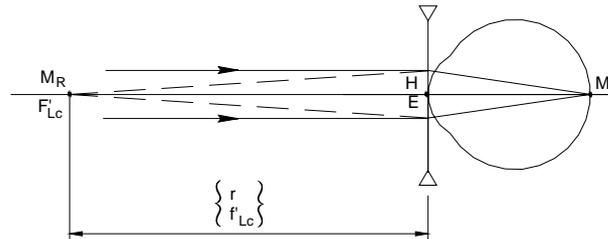


Figura 3.1. Fundamento óptico de la compensación del ojo miópico en visión lejana mediante una lente de contacto.

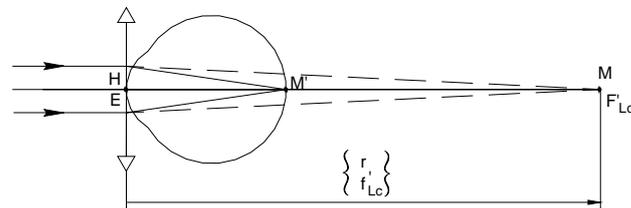


Figura 3.2. Fundamento óptico de la compensación del ojo hipermetrópico en visión lejana mediante una lente de contacto.

Si la compensación se hace con una lente de contacto (*Figura 3.1 y 3.2*) la distancia, entre la lente compensadora y el punto principal de la superficie

reducida del ojo, es nula. En este caso, la distancia focal imagen de la lente de contacto F_c debe ser igual a la distancia del punto remoto del ojo ($f_c = r$), y por lo tanto la potencia F_c debe ser igual a R.

Por ejemplo, un miope de refracción ocular -2,00 dioptrías tiene el punto remoto 50 cm delante del punto principal y se compensa con una lente de contacto cuyo foco imagen está igualmente a 50 cm del punto principal, es decir de -2,00 D de potencia.

La refracción ocular R indica la potencia necesaria para la compensación lejana en el punto principal del ojo.

Cuando la compensación se hace con lentes oftálmicas (gafas) la lente compensadora está situada a una determinada distancia del punto principal del ojo y en consecuencia la potencia de la lente no puede ser igual a R. Por ejemplo, un miope de -4,00 D de refracción ocular, que tiene el punto remoto a 25 cm por delante del plano principal, se puede compensar con una lente de -5,00 D de 20 cm de focal imagen situada 5 cm por delante del punto principal del ojo.

3.2 POTENCIA DE LALENTE COMPENSADORA. REFRACCIÓN OFTÁLMICA.

En la miopía el punto remoto está delante del ojo. Si una lente delgada negativa de potencia F_L se sitúa de manera que, su foco imagen (F') coincida con el punto remoto del ojo, entonces los rayos incidentes paralelos al eje emergerán de la lente con una divergencia tal como si procediesen del punto remoto. De este modo, como M_r es conjugado con la fovea M' , la imagen final se forma en la retina (Figura 3.3).

La distancia positiva d se llama *distancia de vértice* y se mide desde la lente delgada hasta el ojo, oscilando su valor entre 10 y 14 mm para la córnea real, y entre 12 y 16 mm para el vértice del ojo reducido, situado a 2 mm aproximadamente de la córnea del ojo esquemático.

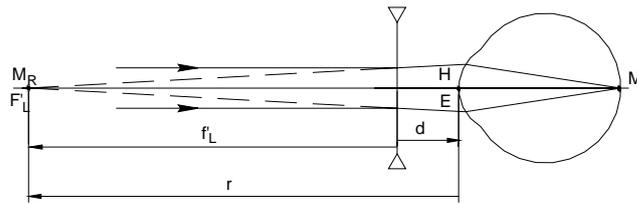


Figura 3.3. Compensación de la miopía en visión lejana con una lente oftálmica delgada negativa.

La hipermetropía se compensa con una lente positiva cuyo foco imagen coincida con el punto remoto situado detrás del ojo (*Figura 3.4*).

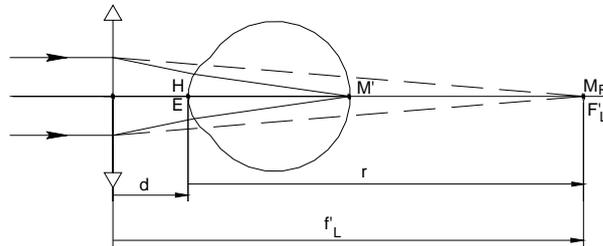


Figura 3.4. Compensación de la hipermetropía en visión lejana con una lente oftálmica delgada positiva.

En ambas ametropías la distancia del remoto será igual a la distancia focal de la lente menos la distancia de la lente al ojo:

$$r = f'_L - d$$

Puesto que R se conoce como refracción ocular, es lógico que la potencia de la lente oftálmica necesaria para compensar una determinada ametropía se llame *refracción oftálmica*, que presupone un valor conocido de la distancia de vértice. La potencia de la lente compensadora es la que

corresponde a una lente cuya distancia focal sea igual a la suma entre la distancia del remoto más la distancia de vértice:

$$f'_L = r + d$$

Teniendo en cuenta que $r = 1/R$ y que $F = 1/F_L$ las expresiones anteriores se pueden transformar en refracción ocular y potencia de la lente compensadora respectivamente, por lo tanto:

$$R = \frac{F_L}{1 - d \cdot F_L} \qquad F_L = \frac{R}{1 + d \cdot R}$$

Estas ecuaciones son útiles para el análisis, pero los cálculos numéricos son más fáciles de realizar como en los siguientes ejemplos:

Ejemplo 1

Un ojo miope con una refracción ocular de -10,00 D se compensa con una lente oftálmica situada a una distancia de vértice de 12 mm. ¿Cuál será la potencia de la lente compensadora?

$$r = 1.000 / -10,00 = -100 \text{ mm}$$

La focal imagen de la lente oftálmica es

$$f'_L = r + d = -100 + 12 = -88 \text{ mm.}$$

Luego la potencia de la lente situada a 12 mm, será:

$$F_L = 1.000 / -88 = -11,36 \text{ D.}$$

Ejemplo 2

Un ojo hipermetrope de +10,00 D se compensa con una lente oftálmica situada a una distancia de vértice de 12 mm. ¿Cuál será la potencia de la lente compensadora?

$$r = 1 / R = 1.000 / +10,00 = +100 \text{ mm.}$$

$$f'_L = (+100) + 12 = +112 \text{ mm.}$$

$$F_L = 1.000 / +112 = +8,93 \text{ D.}$$

Ejemplo 3

Un ojo reducido con un radio de 5,75 mm y una longitud axial de 21,6 mm se compensa con una lente oftálmica a una distancia de 15 mm del punto principal del ojo. ¿Cuál será la potencia de la lente compensadora?

$$R' = \frac{n'}{r'} = \frac{1,336}{21,6 \cdot 10^{-3}} = 61,8D$$

$$F_o = \frac{n'-n}{R} = \frac{1,336-1}{5,75 \cdot 10^{-3}} = 58,40D$$

$$R = R' - F_o = 61,80 - 58,40 = +3,45 \text{ D}$$

$$r = \frac{1.000}{+3,45} = +289 \text{ mm}$$

$$f'_L = r + d = (+289) + 15 = +304 \text{ mm}$$

$$F_L = 1.000 / +304 = +3,28 \text{ D}$$

3.3 COMPENSACIÓN DE LA AMETROPIA CON UNA LENTE REAL

En realidad, F_L representa la potencia frontal o de vértice posterior F'_f de una lente real, es decir la inversa de la distancia en metros desde el vértice posterior de la lente hasta su foco imagen, y corresponde a la potencia que se mide con el frontofocómetro. Todas las lentes oftálmicas van numeradas en potencias frontales lo cual tiene la ventaja práctica de que dos lentes de la misma potencia frontal tendrán el mismo efecto en visión lejana, incluso si difieren considerablemente en forma y espesor.

La sustitución de una lente real por una lente delgada no afecta a los aspectos relativos a la potencia de la lente ni a la refracción ocular, por lo tanto la potencia frontal F'_f de la lente real se puede sustituir por la potencia F_L de una lente delgada situada en el vértice posterior V' de la lente real. En la *Figura 3.5* se muestra la compensación de un ojo hipermetrope con una lente real cuya distancia focal F'_f es igual a la focal imagen F de una lente delgada situada en V' , ambas lentes proporcionan la misma potencia efectiva (R) en el ojo.

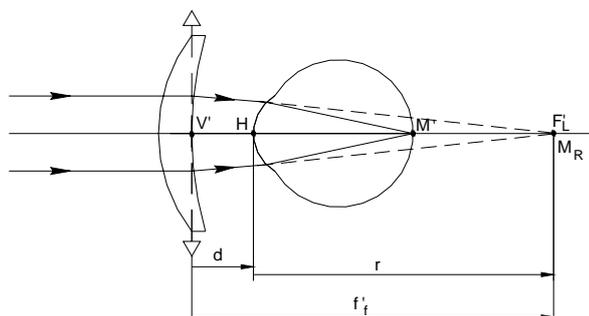


Figura 3.5. Compensación de un ojo hipermetrope con una lente real.

En cuanto al tamaño de la imagen retiniana en el ojo compensado, existen algunas diferencias teóricas entre ambos tipos de lentes.

3.4 EFECTO DEL CAMBIO DE LA DISTANCIA DE VÉRTICE

La potencia de la lente compensadora varía en función de la distancia al ojo. Dos lentes tendrán la misma efectividad desde el punto de vista compensador, cuando a pesar de ser de potencias distintas, al encontrarse a diferentes distancias del ojo, sus focos imagen coinciden con el punto remoto. Por lo tanto, una ametropía se podría compensar con infinito número de lentes, de potencia dióptrica diferente, situadas en infinitas posiciones respecto al ojo.

Con relación a las lentes oftálmicas, la importancia de estos efectos crece al aumentar la potencia dióptrica de la lente, es decir, en ametropías superiores a 5 dioptrías. Por lo tanto, en una prescripción oftálmica se debe indicar tanto la refracción oftálmica F_L como la distancia de vértice d a la que se determinó la refracción. Esto se entiende bien en la adaptación de lentes de contacto, donde se necesita conocer la refracción ocular R .

Las lentes positivas actúan como si fuesen de mayor potencia a medida que se separan del ojo, es decir la efectividad aumenta cuando aumenta la distancia que las separa del ojo. De acuerdo con esto, cuando una lente positiva se aleja del ojo hipermetrope hay que disminuir su potencia para compensar esa misma hipermetropía, y cuando se acerca al ojo hay que aumentar la potencia de la lente.

Con las lentes negativas ocurre lo contrario, cuando se alejan del ojo hay que compensar la ametropía con una lente de mayor valor dióptrico y cuando se acercan con una de menor potencia.

Tanto para la hipermetropía como para la miopía es válida la siguiente regla: si la lente se acerca x mm al punto remoto del ojo, la longitud focal se debe disminuir en x mm. La inversa también es verdadera.

Para una lente a situada a una distancia d del ojo, su focal imagen será

$$f_a = r + d.$$

Si la distancia de vértice aumenta o disminuye en x mm, la focal de la nueva lente compensadora b será:

$$f'_b = r + (d \pm x)$$

$$f'_b = f'_a \pm x$$

En el hipermetrope si la distancia de vértice disminuye, la focal de la nueva lente positiva debe ser menor que la focal de la lente anterior y su potencia mayor para compensar esa hipermetropía. Por lo tanto, las lentes de contacto en los hipermetros tienen más potencia que las lentes oftálmicas correspondientes.

Ejemplo:

En una graduación con el foróptero a 18 mm del ojo se compensa a un hipermetrope con +10,00 D. ¿Cual será la potencia que llevará en la lente oftálmica situada a 12 mm?

La focal de la lente compensadora del foróptero es:

$$f'_L = 1.000 / +10,00 = +100 \text{ mm}$$

$$f'_L = r + 18 = 100 \quad r = +82 \text{ mm}$$

La focal de la lente oftálmica situada a 12 mm será:

$$f'_L = r + 12 = +82 + 12 = +94 \text{ mm}$$

$$F_L = 1.000 / +94 = +10,63 \text{ D.}$$

También se puede calcular la focal de la nueva lente de forma abreviada teniendo en cuenta el desplazamiento o la distometría, en este caso de 6 mm:

$$f_L = r + (d - x)$$

$$f_L = f_{\text{foróptero}} - x$$

$$f_L = +100 - 6 = +94 \text{ mm}$$

$$F_L = 1.000 / +94 = +10,63 \text{ D}$$

Sin embargo, si esta lente de +10,63 D se colocase a 18 mm del ojo, éste quedaría hiperconvergiendo produciéndose una miopía artificial.

En la miopía, si la distancia ojo-lente disminuye, la focal de la nueva lente compensadora será mayor que la focal de la lente anterior y de menor potencia. Por lo tanto, contrariamente a lo que ocurría en la hipermetropía, en la miopía cuanto más próxima esté la lente del ojo menor será la potencia necesaria para compensar la misma miopía. Luego, la lente compensadora será más eficaz cuanto más cerca esté del ojo y las lentes de contacto tendrán menor potencia que las lentes oftálmicas correspondientes.

Ejemplo:

En una graduación con el foróptero a 18 mm se compensa a un ojo miope con -10,00 D. ¿Cuál será la potencia de la lente oftálmica para una distancia de vértice de 12 mm?

La lente se mueve 6 mm más cerca del ojo, por lo tanto, en este caso, 6 mm más lejos del punto remoto del ojo. De acuerdo con la regla, la distancia focal de la lente se debe aumentar en la misma cantidad.

La focal de la lente del foróptero es

$$f_L = 1.000 / -10,00 = -100 \text{ mm}$$

La focal de la nueva lente compensadora será:

$$f_L = f_{\text{foróptero}} - x = -100 - 6 = -106 \text{ mm}$$

$$\text{La nueva potencia } F_L = 1.000 / -106 = -9,43 \text{ D}$$

3.5 LA IMAGEN RETINIANA EN LAS AMETROPIAS COMPENSADAS CON LENTES DELGADAS

En el estudio de la formación de la imagen retiniana en el ojo reducido compensado con lentes delgadas se distinguen dos etapas:

Primera, la lente forma una imagen real o virtual, independientemente del ojo, de acuerdo con la ley de los puntos conjugados. Segunda, esta imagen se vuelve un objeto para el ojo. Con relación al ojo, la primera imagen hace de objeto real si se forma delante del ojo y de objeto virtual si la imagen se forma detrás de él.

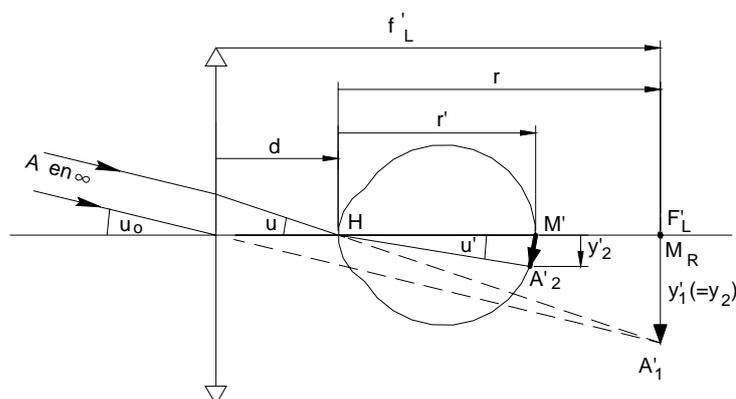


Figura 3.6. Formación de la imagen retiniana en el ojo hipermetrópico compensado.

La *Figura 3.6* representa un ojo hipermetrópico en estado relajado, compensado para lejos con una lente delgada de potencia F_L a una distancia del vértice d . Los rayos paralelos procedentes del extremo A de un objeto lejano

hacen un ángulo u_0 con el eje óptico en el plano de la lente, y son refractados por la lente para formar una imagen real A'_1 en el plano de su foco imagen F'_L . La posición de A'_1 en ese plano está determinada por el rayo que pasa sin desviarse a través del centro óptico de la lente y por el rayo que después de refractarse en la lente compensadora incide en el punto principal del ojo haciendo un ángulo u con el eje óptico. La distancia $F'_L A'_1$, designada por y'_1 , representa la altura de la imagen después de la primera refracción y se convierte en la altura del objeto (y_2) para la segunda refracción.

Después de la refracción en el ojo, el rayo principal hace un ángulo menor u' con el eje tal que $u' = u/n'$. La intersección del rayo refractado con la retina determina el segundo punto imagen A'_2 y su distancia hasta el eje óptico (y'_2).

La *Figura 3.7* representa, básicamente, la misma construcción aplicada al ojo miópico compensado con una lente negativa.

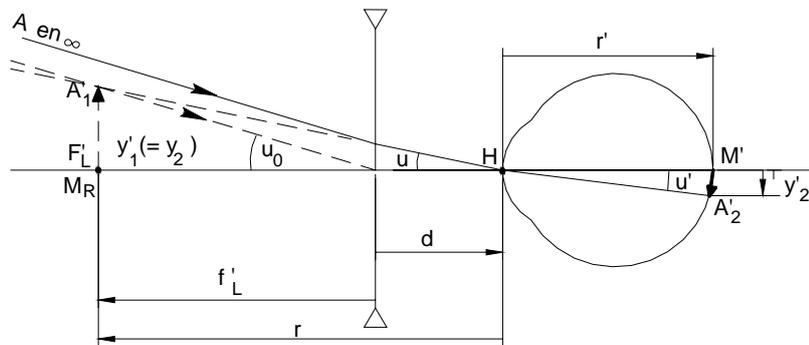


Figura 3.7. Formación de la imagen retiniana en el ojo miópico compensado.

El tamaño de la imagen retiniana (y'_2) se puede obtener si se conoce el tamaño de la primera imagen (y'_1), ya que ésta luego actuará como objeto para el ojo:

$$y'_1 = y_2 = -u_0 \cdot f'_L \quad (u_0 \text{ en radianes})$$

Como este objeto (y_2) debe estar situado en el plano del punto remoto para que sea conjugado con la retina y que la imagen final sea nítida, las vergencias objeto e imagen para la segunda refracción, S_2 y S'_2 deben ser iguales a R y R' respectivamente. Por lo tanto:

$$y'_2 = y_2 \frac{R}{R'}$$

El tamaño de la imagen retiniana enfocada y'_2 en el ojo compensado también se designa por y'_c , el subíndice c en referencia a “compensado”. Así,

$$y'_c = -f'_L \cdot u_0 \times \frac{R}{R'}$$

Por otra parte, si se tiene en cuenta que

$$u = -\frac{y'_1}{r} \quad \text{y que} \quad u' = -\frac{y'_2}{r'}$$

el tamaño de la imagen compensada también se podrá calcular a partir de

$$y'_c = -u' \cdot r' = -\frac{u}{n'} \cdot r'$$

Ejemplo 1:

Un ojo con una longitud axial de 24,80 mm se compensa para visión lejana con una lente de -5,00 D situada a 12 mm de su punto principal. Calcular el tamaño de la imagen retiniana de un objeto lejano que subtende un ángulo de 0,15 radianes en el plano de la lente. ($n' = 1,336$)

Primera refracción:

$$f_L = 1000 / -5,00 = -200 \text{ mm}$$

$$y'_1 = y_2 = -0,15 \cdot -200 = + 30 \text{ mm}$$

Segunda refracción:

- *primer método*

$$r = f_L - d = -200 - 12 = -212 \text{ mm}$$

$$R = 1000 / -212 = - 4,72 \text{ D}$$

$$R' = \frac{1,336 \cdot 1000}{24,8} = +53,87 \text{ D}$$

$$y'_2 = y_2 \frac{R}{R'} = 30 \cdot \frac{-4,72}{53,8} = -2,63 \text{ mm}$$

- *segundo método*

$$r = f_L - d = -200 - 12 = -212 \text{ mm}$$

$$u = -\frac{y'_1}{r} = -\frac{30}{-212} = 0,1415 \text{ radianes}$$

$$u' = \frac{u}{n'} = \frac{0,1415}{1,336} = 0,1059 \text{ radianes}$$

$$u' = -\frac{y'_2}{r'}$$

$$y'_c = -u' \cdot r' = -0,1059 \cdot 24,8 = -2,63 \text{ mm}$$

Ejemplo 2:

Un ojo reducido hipermetrópico de longitud axial 22,27 mm se compensa con una lente delgada de +4,00 D a 10 mm. Calcular los tamaños básicos de las imágenes retinianas en el ojo sin compensar y en el compensado para un objeto lejano que subtende 3°.

El tamaño básico de la imagen retiniana en el ojo sin compensar es:

$$y' = -\frac{\tan u}{R'} = -\frac{r'}{n'} \tan u = -\frac{22,27}{1,336} \tan 3^\circ = -0,873 \text{ mm}$$

Para calcular el tamaño de la imagen retiniana en el ojo compensado se tiene que calcular el valor de la refracción ocular R y también el valor de R'.

$$R = \frac{F_L}{1 - dF_L} = \frac{+4,00}{1 - 0,010 \times 4,00} = +4,167 \text{ D.}$$

$$R' = \frac{n'}{r'} = \frac{1,336}{22,27} = +60,00 \text{ D.}$$

La focal imagen f'_L de la lente compensadora es

$$f'_L = \frac{1}{F} = \frac{1}{+4,00} = +250 \text{ mm.}$$

$$y'_c = -f'_L \times \tan u_0 \times \frac{R}{R'} = -250 \times \tan 3^\circ \times \frac{4,167}{60} = -0,910 \text{ mm}$$

El tamaño de la imagen en el ojo hipermetrópico compensado es mayor que el tamaño de la imagen en el ojo sin compensar $y'_c > y'$. Lo contrario ocurre en el ojo miópico $y'_c < y'$.

3.6 AUMENTO DE LALENTE OFTÁLMICA

El aumento de la lente oftálmica se refiere a los cambios en el tamaño de la imagen retiniana como resultado de llevar o gafas o lentes de contacto. Este aspecto es muy importante en la práctica optométrica ya que se pueden notar fácilmente cambios de un 1% en el tamaño de la imagen retiniana y con mucha frecuencia los pacientes mencionan ese cambio con lentes relativamente débiles como son un par de lentes esféricas de +1,00 D para la lectura. El sujeto que por primera vez se pone unas gafas con lentes esféricas de -3,00 D experimenta una reducción en el tamaño de su imagen retiniana de casi un 3%. Sin embargo, al cabo de cierto tiempo este efecto se deja de percibir.

La imagen retiniana en el ojo ametrópico sin compensar no siempre es borrosa, ya que en el caso de la hipermetropía esta imagen se puede enfocar si se dispone de la suficiente acomodación. Para cubrir ambas posibilidades, se considera como tamaño de la imagen retiniana en el ojo no compensado, su tamaño básico, que es independiente del grado de borrosidad. Por lo tanto, el aumento de la lente oftálmica compensadora (SM, spectacle magnification) se puede definir como la razón,

SM = tamaño de la imagen retiniana en el ojo compensado / tamaño básico de la imagen retiniana en el ojo sin compensar

En este contexto, la palabra “compensado” simplemente implica que se lleva una lente, independientemente del grado en que ésta “compensa” la ametropía.

Como el tamaño básico de la imagen retiniana es directamente proporcional al ángulo subtendido por el objeto en el centro de la pupila de entrada del ojo, el aumento de la lente compensadora se puede definir en términos más generales como

$$SM = u / u_0$$

siendo u el ángulo subtendido, en el centro de la pupila de entrada, por la imagen que forma la lente y u_0 el ángulo subtendido por el objeto en el centro de la pupila de entrada cuando el ojo observa directamente el objeto.

Por otra parte, se llega a la misma razón angular para el aumento teniendo en cuenta las fórmulas para el tamaño de la imagen retiniana sin compensar, y cuando se compensa con una lente delgada. Así,

$$SM = y'_c / y'_b = \frac{-u \cdot \frac{r'}{n'}}{-u_0 \cdot \frac{r'}{n'}} = \frac{u}{u_0}$$

Por lo tanto, el aumento solamente se ve afectado por la diferencia entre los ángulos subtendidos por el rayo principal en la superficie reducida (centro de la pupila de entrada).

En el ojo sin compensar el rayo principal procedente del extremo superior de un objeto lejano incide en la superficie reducida haciendo un ángulo u_0 con el eje óptico. Cuando este ojo se compensa el ángulo subtendido por el rayo principal en la lente también es u_0 , siendo u el ángulo subtendido por el rayo principal en el centro de la pupila de entrada (superficie reducida del ojo) después de su refracción en la lente (*Figura 3.8*).

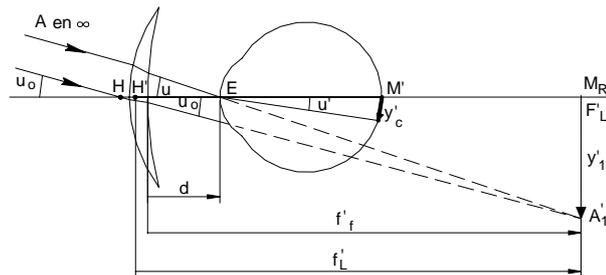


Figura 3.8. Aumento de la lente oftálmica para visión lejana en el ojo reducido: razón entre el ángulo u subtendido por la imagen y'_1 en el centro de la pupila de entrada del ojo y el ángulo u_0 subtendido por el objeto lejano.

En el caso de una lente real (lente gruesa) situada a una distancia de vértice d de la superficie reducida del ojo (*Figura 3.8*), el aumento de la lente oftálmica es,

$$SM = \frac{y'_c}{y'} = \frac{1}{1 - d \cdot F'_f} \times \frac{1}{1 - (e/n) \cdot F_1}$$

El primer término es el aumento debido a la potencia frontal de la lente F'_f y se llama *factor de potencia*, simbolizado por P. El segundo término, depende del espesor axial (e) de la lente y de su índice refractivo (espesor reducido), así como de la forma de la lente determinada por la potencia de la superficie anterior F_1 . Este término se llama, por lo tanto, *factor de forma* S. Se puede escribir

$$\text{Aumento de la lente oftálmica} = \text{Factor de Potencia} \times \text{Factor de Forma} = P \cdot S$$

En el caso de las lentes negativas, el espesor reducido es del orden de 0,001 mm y el factor de forma es apenas mayor que la unidad. Así, en las lentes negativas, el factor de forma contribuye poco al aumento de la lente compensadora. Debido a que este factor es relativamente pequeño las lentes negativas se pueden considerar como lentes delgadas.

En una lente delgada se considera que el espesor axial e es igual a cero, con lo que el factor de forma es igual a la unidad y se puede ignorar. Por lo tanto, en el caso de una lente oftálmica delgada la fórmula del aumento se reduce a,

$$SM = \frac{y'_c}{y'} = \frac{1}{1 - d \cdot F_L}$$

donde solamente aparece el factor de potencia, y la potencia frontal F'_f de la lente real se ha reemplazado por la potencia F_L de la lente oftálmica delgada.

También se puede llegar a esta ecuación sin recurrir a la teoría de lentes gruesas. Por definición:

$$SM = \frac{y'_c}{y'_b} = \frac{-f'_L \times u_0 \times \frac{R}{R'}}{-\frac{u_0}{R'}}$$

teniendo en cuenta que $F_L = 1 / f_L$

$$SM = \frac{R}{F_L} \quad \text{y como}$$

$$R = \frac{F_L}{1 - d \cdot F_L}$$

se obtiene que

$$SM = \frac{1}{1 - d \cdot F_L}$$

Cuando se desarrolla esta división se llega a la siguiente fórmula binomial

$$SM = 1 + d F_L + (d F_L)^2 + \text{términos de orden superior}$$

En las lentes oftálmicas siempre se cumple que $|d F_L| < 1$, por lo que los términos elevados a potencias iguales o superiores a 2 se hacen insignificamente pequeños. Por lo tanto, se pueden despreciar para llegar a la fórmula aproximada de

$$SM = 1 + d \cdot F_L$$

El término $d F_L$ representa el cambio fraccional experimentado en el tamaño de la imagen retiniana cuando se llevan puestas las gafas respecto del tamaño de la imagen retiniana sin gafas. Esto se comprende mejor cuando se despeja y'_c de la fórmula del aumento

$$SM = \frac{y'_c}{y'} = 1 + d \cdot F_L, \text{ así } y'_c = y' + d F_L \cdot y'$$

Ahora es evidente que y'_c difiere de y' por la fracción $d F_L$ que será positiva o negativa de acuerdo con el signo de F_L , la potencia de la lente compensadora. Por lo tanto, para los hipermétropes con un valor positivo de F_L , el tamaño de la imagen retiniana compensada será mayor que la imagen sin compensar. Sin embargo, en los miopes la lente negativa reduce el tamaño de la imagen retiniana.

Ejemplo:

Calcular el cambio fraccional en el tamaño de la imagen retiniana cuando un ojo reducido se corrige a 10 mm con a) una lente delgada de -5 D, b) una lente delgada de +6 D.

a) El cambio fraccional es $d F = 0,010 \times (-5) = -0,05$

b) De igual manera, $d F = 0,010 \times (+6) = +0,06$

Por lo tanto, en el caso miópico a) hay un 5% de reducción en el tamaño de la imagen retiniana del ojo compensado, mientras que en el caso hipermetrópico b) hay un 6% de incremento con las gafas. Aunque la distancia de vértice varíe de un caso a otro, se puede deducir de los ejemplos anteriores una regla aproximada que dice, que cada dioptría de potencia de la lente oftálmica produce “aproximadamente” un cambio de un 1% en el tamaño de la imagen retiniana. Por supuesto, el cambio es un incremento para potencias positivas y una disminución para potencias negativas.

El aumento de la lente oftálmica siempre es un valor positivo, que se debe calcular por lo menos con 3 decimales, en la miopía es menor de la unidad y en la hipermetropía mayor de la unidad. Así, al hipermetrope recién compensado le parecerá que los objetos familiares son más grandes de lo habitual, mientras que al miope le parecerán más pequeños.

Ejemplos:

a) $F_L = -11,75 \text{ D}$ y $R = -10,00 \text{ D}$

$$SM = -10,00 / -11,75 = +0,8510$$

$$b) F_L = +9,00 \text{ D} \quad y \quad R = +10,00 \text{ D} ; d = +11,1 \text{ mm}$$

$$SM = +10,00 / +9,00 = +1,111$$

$$c) F_L = +8,50 \text{ D} \quad y \quad R = +10,00 \text{ D} ; d = +17,6 \text{ mm}$$

$$SM = +10,00 / +8,50 = +1,176$$

En los dos últimos casos b) y c) se ve que para la misma refracción ocular cuanto mayor es la distancia de vértice mayor es el aumento. Por lo tanto, en la hipermetropía el tamaño de la imagen retiniana crece cuando la distancia de la lente compensadora al ojo aumenta. Este caso es muy evidente en un sujeto afáxico compensado con lentes oftálmicas, donde el enorme aumento del tamaño de la imagen retiniana es uno de los mayores problemas que existen al principio de llevar las gafas.

En la miopía ocurre lo contrario, el tamaño de la imagen retiniana aumenta cuando la distancia de la lente compensadora al ojo disminuye. Según esto, las lentes de contacto tienen la ventaja de proporcionar un tamaño de imagen retiniana mayor que las lentes oftálmicas, que reducen el tamaño.

En el caso de las lentes compensadoras positivas, existen diferencias notables en el aumento que producen según se considere la lente delgada o gruesa.

Ejemplo:

Calcular el aumento de la lente oftálmica cuando un ojo hipermetrópico se compensa a 13 mm con a) una lente delgada de +5 D y b) una lente gruesa de potencia frontal $F_f = +5 \text{ D}$, la potencia de la superficie anterior es $F_1 = +10,32 \text{ D}$, el espesor axial es $e = 9 \text{ mm}$, y el índice refractivo es $n_v = 1,5$.

$$A) SM = \frac{y'_c}{y'} = \frac{1}{1 - dF_L} = \frac{1}{1 - 0,013 \times (+5)} = +1,070$$

$$\begin{aligned}
 \text{B) } SM &= \frac{y'_c}{y'} = \frac{1}{1 - dF'_f} \times \frac{1}{1 - (e/n) \cdot F_1} = \\
 &= \frac{1}{1 - 0,013 \times (+5)} \times \frac{1}{1 - \frac{0,009}{1,5} \times (+10,32)} = 1,070 \times 1,066 = 1,141.
 \end{aligned}$$

En este ejemplo, el factor potencia llega a 1,070 y el factor de forma a 1,066. Mientras que el aumento con una lente delgada es solo del 7,0%, cuando el mismo ojo se compensa con una lente real presenta un 14,1% de incremento en el tamaño de la imagen retiniana. Si se tiene en cuenta que experimentalmente se ha encontrado que los sujetos pueden detectar cambios tan pequeños como un 0,25% en el tamaño de la imagen retiniana, los cambios deducidos en este ejemplo para los dos tipos de lentes son considerables.

3.7 AUMENTO RELATIVO DE LALENTE OFTÁLMICA

Se conoce como *aumento relativo de la lente oftálmica* (RSM) la relación entre el tamaño de la imagen retiniana de un objeto lejano en el ojo ametrópico compensado (y'_c) y el tamaño de la imagen retiniana de ese objeto en un determinado ojo emétrope, en este caso el ojo reducido (y'_e). Para ambos ojos se asume la misma distancia objeto. Por lo tanto,

$$RSM = y'_c / y'_e$$

$$y'_e = -u'_0 \cdot r' = -\frac{u_0}{n'} \cdot r' = -\frac{u_0}{R'_e}$$

Utilizando la expresión de y'_c correspondiente a la compensación con lente delgada, se obtiene

$$\text{RSM} = \frac{y'_c}{y'_e} = \frac{-f'_L \times u_0 \times \frac{R}{R'}}{-\frac{u_0}{R'_e}} = \frac{R}{F_L} \times \frac{R'_e}{R'}$$

donde R y R' se refieren al ojo amétrope y R / F_L corresponde al aumento de una lente compensadora delgada, así ahora se puede escribir

$$\text{RSM} = \text{SM} \times \frac{R'_e}{R'}$$

$$\text{ó, como } R'_e = \frac{n_e}{r'_e} \quad \text{y} \quad R' = \frac{n_e}{r'}$$

$$\text{RSM} = \text{SM} \times \frac{r'}{r'_e}$$

donde el término r' / r'_e se conoce como factor de elongación.

En esta última expresión se pone de manifiesto la diferencia entre ametropía axial y refractiva. En la ametropía refractiva $r' = r'_e$ y el aumento relativo se reduce a

$$\text{RSM} = \text{SM}.$$

Si la lente oftálmica es gruesa, el aumento relativo viene dado por la expresión

$$\text{RSM} = P \times S \times \frac{R'_e}{R'}$$

donde P y S son los factores de potencia y de forma respectivamente y su producto el aumento para una lente gruesa.

El interés del aumento relativo de la lente oftálmica está asociado principalmente con la visión binocular, en particular con la anisometropía y la afaquia. En la anisometropía uno de los ojos tiene una ametropía marcadamente diferente en comparación con el otro ojo. En la afaquia la ausencia del cristalino produce, generalmente, una hipermetropía elevada y si solo uno de los ojos es afáquico, pueden aparecer algunos problemas en la visión binocular.

En estos casos es muy posible que existan diferencias en el tamaño de las imágenes retinianas de los dos ojos (aniseiconía). Cuando esta diferencia es mayor de un 5% aparecen problemas con la fusión. Para tener una idea de las diferencias relativas, los tamaños de las imágenes retinianas se comparan con el tamaño de la imagen retiniana en el ojo emétrope. Así, la razón de las RSM de los dos ojos indica la razón de los tamaños de imagen retiniana de ambos ojos después de la compensación.

En la práctica clínica habitual no es fácil determinar la RSM ya que es necesario conocer los parámetros ópticos del ojo y, mediante ultrasonografía, su longitud axial. Además, la utilidad de la RSM se cuestiona cuando se considera que tamaños de imágenes retinianas diferentes se pueden percibir igual si tienen la misma representación en la corteza visual. La idea de que los dos tamaños deben ser iguales es errónea y su utilidad cuestionable.

4 ASTIGMATISMO OCULAR

En los ojos emétopes y amétopes esféricos estudiados hasta ahora las zonas útiles de la córnea, las caras anterior y posterior del cristalino y la región macular de la retina se han considerado como superficies esféricas, es decir, con simetría de curvatura alrededor de su eje principal y por lo tanto con la misma curvatura en todos los meridianos. En estas condiciones, el haz refractado por el ojo es homocéntrico y los rayos emitidos por un punto objeto situado sobre el eje principal del sistema óptico forman un punto imagen. Sin embargo, cuando las superficies refractivas oculares presentan diferentes curvaturas en diferentes meridianos, no pueden formar un punto imagen de un punto objeto.

Este tipo de superficie cuya curvatura progresa desde un valor mínimo a un valor máximo en meridianos perpendiculares entre sí se llama astigmática, y en ella los rayos emitidos por un punto objeto no sufren la misma desviación en todos los meridianos, en vez de un punto focal simple hay dos líneas focales separadas entre sí por un intervalo focal, cuya longitud está en razón directa con la diferencia de potencia en los dos meridianos principales.

4.1 CAUSAS DEL ASTIGMATISMO

La córnea y las superficies del cristalino son los factores principales que contribuyen a que al menos exista un ligero grado de astigmatismo en la mayoría de los ojos humanos, siendo el *astigmatismo corneal* la mayor causa de astigmatismo ocular.

Al igual que la mayor potencia de la córnea se debe a la cara anterior, también la mayor parte del astigmatismo corneal se debe a la superficie anterior de la córnea y muy poco a la superficie posterior. La superficie frontal de la córnea no es esférica, incluso en la zona próxima al eje óptico, y con mucha frecuencia presenta el meridiano de máxima curvatura próximo a la vertical. Cuando el meridiano principal de mayor potencia está cercano a la vertical el astigmatismo corneal se conoce como *astigmatismo directo o según la regla*. Sin embargo, si el meridiano de máxima curvatura está próximo a la horizontal se le llama *astigmatismo inverso o contra la regla*.

El astigmatismo según la regla se acepta como fisiológico cuando su valor no supera las 0,25 D. Es probable que este tipo de astigmatismo se deba a la presión constante del párpado superior sobre la córnea, que provoca un aumento de la curvatura vertical y un aumento de la potencia en este meridiano.

Aproximadamente el 90% de los niños con astigmatismo corneal presentan astigmatismo según la regla. En el adulto, este astigmatismo disminuye a menos del 80% de los casos y con el envejecimiento tiende a desaparecer o, incluso a convertirse en un astigmatismo contra la regla.

El *astigmatismo lenticular* es el astigmatismo debido a la lente del cristalino. La causa puede ser una asimetría de curvatura de cualquiera de las superficies o de ambas aunque es difícil hacer medidas precisas; pero incluso si ambas superficies se pudiesen considerar esféricas, cualquier descentramiento o inclinación de la lente del cristalino con respecto al eje visual podría originar un astigmatismo oblicuo, la lente del cristalino generalmente está inclinada entre 3° y 7° alrededor del eje vertical, con el lado temporal desplazado hacia la córnea. Para producir un astigmatismo lenticular de 0,50 D se necesitaría una inclinación de casi 14°. Por otra parte, en el cristalino tiene lugar fisiológicamente cierto grado de astigmatismo de índice, que suele ser ligero y

se debe a pequeñas desigualdades del índice de refracción de los distintos sectores de la lente, pero puede acentuarse hasta producir una distorsión considerable en las alteraciones manifiestas de las cataratas.

El astigmatismo lenticular generalmente es contra la regla y no suele exceder 1,5 D. En el joven alcanza de 0,50 a 0,75 D y más allá de los 50 años hay una tendencia a incrementarse, encontrándose, en este último grupo de población, una mayor proporción de sujetos con 1 D o 1,25 D.

La diferencia entre el astigmatismo corneal medido por el queratómetro y el astigmatismo ocular total indicado por la lente compensadora, teniendo en cuenta la distancia de vértice, proporciona el valor del astigmatismo lenticular.

Con relación al tipo de astigmatismo, Saunders (1981) ha encontrado que con la edad el astigmatismo según la regla disminuye y el astigmatismo contra la regla aumenta, con aproximadamente igual número de dichas prescripciones en sujetos alrededor de los 45 años.

4.2 FORMACIÓN DE LA IMAGEN EN EL OJO ASTIGMÁTICO

El astigmatismo ocular se puede estudiar tomando como modelo el ojo reducido. La superficie refractiva única tendrá diferentes curvaturas y diferentes potencias en los dos meridianos principales mutuamente perpendiculares. Para distinguirlos al meridiano de máxima curvatura se le designa por 1 y al meridiano de mínima curvatura por 2.

Por lo tanto

F_1 = potencia del ojo en el meridiano principal más potente

F_2 = potencia del ojo en el meridiano principal más débil

Dado un objeto a una distancia dióptrica S , las respectivas vergencias después de la refracción en el ojo son:

$$S'_1 = S + F_1$$

$$S'_2 = S + F_2$$

En consecuencia, el astigmatismo ocular es la diferencia entre F_1 y F_2 y no necesita signo + o -.

$$\text{Ast} = F_2 - F_1$$

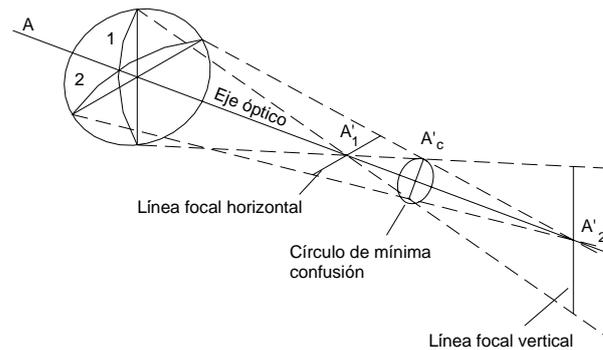


Figura 4.1. Haz astigmático refractado en un ojo con astigmatismo directo o según la regla.

Las principales características del haz refractado en el ojo astigmático se muestran en la *Figura 4.1* en la que se ha supuesto un ojo con astigmatismo directo donde el meridiano vertical es el más potente y el meridiano horizontal es el de mínima potencia. En la figura, el haz de rayos procedentes del punto objeto O en el eje se refractará de distinta forma según el meridiano que atraviese. Los rayos que inciden sobre puntos del meridiano vertical (1) convergerán en el foco O'_1 en el eje óptico. Los rayos incidentes contenidos en otras secciones verticales del haz se llevarán a focos en el mismo plano de O'_1 pero a diferentes distancias del eje, por lo tanto formarán una línea focal horizontal de la que O'_1 es el punto medio, esta línea será perpendicular al plano que contiene el meridiano vertical. Igualmente, los rayos incidentes en puntos del meridiano horizontal (2) focalizarán en un punto axial O'_2 a mayor distancia de la superficie reducida que O'_1 debido a la menor potencia de este meridiano. Como en el caso anterior, el foco axial O'_2 se extenderá en una

línea focal, en este caso vertical, debido a los rayos refractados que pasan a través de las otras secciones horizontales de la superficie refractiva. Esta línea focal vertical será perpendicular a su meridiano horizontal y además, como es la última línea focal será paralela al meridiano más potente.

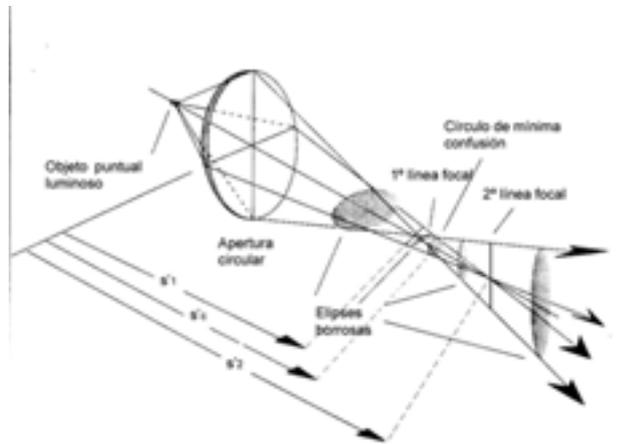


Figura 4.2. Secciones transversales del haz de rayos refractado por el sistema astigmático ocular.

En el haz de luz formado por el sistema astigmático (conoide de Sturm), las secciones perpendiculares al eje tiene distinta forma en los diferentes puntos del conoide (*Figura 4.2*). Teniendo en cuenta que la apertura del sistema (en este caso, la pupila) es circular, la forma de la sección transversal del haz refractado es, en general, elíptica variando su forma y dimensiones con la distancia desde la superficie astigmática. La elipse degenera en una línea en cada uno de los dos planos principales imagen. Solamente en la mitad del camino dióptrico, no geométrico, entre las dos líneas focales, la sección transversal del fascículo refractado es circular y se conoce como círculo de mínima confusión. En los otros puntos del haz su forma es elíptica, con el eje mayor orientado en el sentido de la línea focal correspondiente. Por lo tanto, en el sistema ocular la imagen de un punto objeto dependerá de la posición de la retina en el haz astigmático y nunca será un punto imagen.

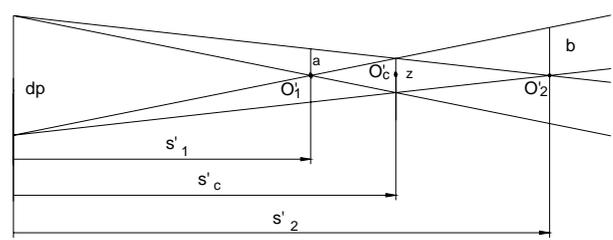


Figura 4.3. Superposición de las secciones transversales del haz astigmático en los dos meridianos principales para deducir las longitudes de las líneas focales y el diámetro del círculo de mínima confusión.

Las longitudes de las líneas focales y el diámetro del círculo de mínima confusión pueden ser deducidas con la ayuda de un diagrama como el de la *Figura 4.3* en el que las secciones transversales del haz astigmático en los dos meridianos principales están superpuestas. Los rayos que se refractan en el meridiano principal más potente convergen en la primera línea focal que pasa a través de O_1' , mientras que la segunda línea focal pasa a través de O_2' . La longitud de estas dos líneas focales, denominadas a y b respectivamente, se determinan cada una por la sección transversal del haz en el otro meridiano. Por otra parte, el círculo de mínima confusión tiene su centro en O'_c donde las dos secciones transversales del haz tienen la misma anchura, z .

Si las distancias de O_1' , O_2' y O'_c desde el punto principal del ojo se designan por s'_1 , s'_2 y s'_c respectivamente y por d_p se designa el diámetro pupilar, de los triángulos similares del diagrama se deducen las siguientes expresiones:

Longitud de la primera línea focal (a)

$$a = d_p \cdot \left(\frac{s'_2 - s'_1}{s'_2} \right) = d_p \cdot \left(\frac{S'_1 - S'_2}{S'_1} \right) = d_p \cdot \frac{Ast}{S'_1}$$

Longitud de la segunda línea focal (b)

$$b = d_p \cdot \left(\frac{s'_2 - s'_1}{s'_1} \right) = d_p \cdot \left(\frac{S'_1 - S'_2}{S'_2} \right) = d_p \cdot \frac{Ast}{S'_2}$$

Diámetro del círculo de mínima confusión (z)

$$z = d_p \cdot \left(\frac{s'_2 - s'_c}{s'_2} \right) = d_p \cdot \left(\frac{s'_c - s'_1}{s'_1} \right)$$

Teniendo en cuenta que el círculo de mínima confusión está, dióptricamente, a medio camino entre las dos líneas focales

$$S'_c = \frac{1}{2}(S'_1 + S'_2)$$

por lo tanto

$$z = d_p \cdot \left(\frac{S'_1 - S'_2}{S'_1 + S'_2} \right) = d_p \cdot \frac{Ast}{S'_1 + S'_2}$$

Dado que S'_1 y S'_2 difieren solamente por la cantidad de astigmatismo ocular, que es relativamente pequeño, las dos líneas focales serán aproximadamente de la misma longitud, alrededor de dos veces el diámetro del círculo de mínima confusión.

Ejemplo

Un punto objeto axial situado en el infinito es observado por tres ojos astigmáticos reducidos ($n' = 1,336$) que tienen un diámetro pupilar de 4 mm, una longitud dióptrica (R') de +60 D y las siguientes potencias en los meridianos principales:

a) $F_{180} = +58 \text{ D}$ y $F_{90} = +62 \text{ D}$

b) $F_{135} = +60 \text{ D}$ y $F_{45} = +58 \text{ D}$

$$c) F_{180} = +58 \text{ D} \text{ y } F_{90} = +56 \text{ D}$$

1- Describir las características de la imagen en la retina, asumiendo que la potencia del ojo permanece constante en cada caso.

2- Calcular el tamaño de la imagen en la retina.

$$a) F_{180} = +58 \text{ D} \text{ y } F_{90} = +62 \text{ D}$$

Para un objeto en el infinito, la vergencia incidente en todos los meridianos será cero, y las vergencias emergentes en los meridianos principales serán:

$$S'_{180} = S + F_{180} = 0 + 58 = +58 \text{ D}$$

$$S'_{90} = S + F_{90} = 0 + 62 = +62 \text{ D}$$

Estas vergencias emergentes representan las distancias dióptricas de las líneas focales y el mayor valor numérico representa la distancia dióptrica de la línea focal más próxima a la superficie astigmática.

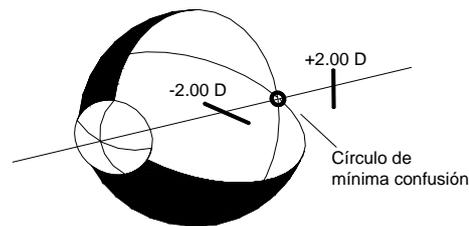


Figura 4.4. Posición de las líneas focales con relación a la retina. El círculo de mínima confusión está situado sobre la retina.

En este caso la vergencia emergente del meridiano vertical excede la longitud dióptrica del ojo en 2 D. Por lo tanto, el meridiano vertical formará una línea focal horizontal que estará -2 D delante de la retina (Figura 4.4). La potencia del meridiano horizontal es 2 D más

débil que la distancia dióptrica del ojo y formará una línea focal situada +2 D detrás de la retina.

Por lo tanto, cuando se estudian las características de un haz astigmático puede ser útil pensar en la posición dióptrica de las líneas focales y del círculo de mínima confusión en términos de su distancia ametrópica a la retina. Así por ejemplo, 2,00 D delante de la retina representa la posición imagen correspondiente a -2,00 D de miopía, mientras que 2,00 D detrás de la retina representa la posición imagen correspondiente a +2,00 D de hipermetropía. De este modo, la posición dióptrica de cada línea se indica por el cambio de potencia que sería necesario realizar en los meridianos de la superficie reducida para situar las líneas focales en la retina.

En el ejemplo a), la parte del haz astigmático que estará sobre la retina será el círculo de mínima confusión, situado dióptricamente a medio camino entre las dos líneas focales.

$$S'_c = \frac{1}{2}(S'_1 + S'_2) = \frac{1}{2}(62 + 58) = +60D$$

Esta distancia dióptrica del círculo de mínima confusión es la misma que la distancia dióptrica (R') del ojo. Por lo tanto, el círculo de mínima confusión estará sobre la retina. Su diámetro corresponde al tamaño de la imagen de un punto objeto axial.

$$z = d_p \cdot \left(\frac{S'_1 - S'_2}{S'_1 + S'_2} \right) = 4 \cdot \left(\frac{62 - 58}{62 + 58} \right) = 0,1333mm$$

b) $F_{135} = +60 D$ y $F_{45} = +58 D$

El meridiano de 45° es menos potente en 2 D y formará la segunda línea focal a 135° que se nombra como +2 D indicando que está detrás de la retina. El meridiano de 135° es el más potente y formará una línea focal a 45° situada sobre la retina, ya que la vergencia imagen para un objeto lejano situado en el infinito es

$$S'_{135} = S + F_{135} = 0 + 60 = +60 D$$

Por lo tanto, el tamaño de la imagen de un punto será igual a la longitud de la primera línea focal.

$$a = d_p \cdot \left(\frac{S'_1 - S'_2}{S'_1} \right) = 4 \cdot \left(\frac{60 - 58}{60} \right) = 0,1333 \text{ mm}$$

c) $F_{180} = +58 \text{ D}$ y $F_{90} = +56 \text{ D}$

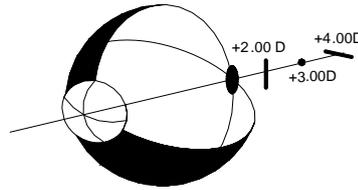


Figura 4.5. Posición de las líneas focales con relación a la retina.

El meridiano de 90° es menos potente en 4 D y formará una línea focal horizontal 4 D detrás de la retina que será la que está situada más lejos de la superficie refractiva (Figura 4.5). La línea focal vertical que forma el meridiano horizontal estará situada +2 D detrás de la retina y el círculo de mínima confusión a +3D detrás de la retina. Estas deducciones se pueden verificar poniendo $S = 0$ en cada meridiano, así tenemos

$$S'_2 = S'_{90} = S + F_{90} = 0 + 56 = +56 \text{ D}$$

$$S'_1 = S'_{180} = S + F_{180} = 0 + 58 = +58 \text{ D}$$

que muestra como las líneas focales deben estar detrás de la retina si se tiene en cuenta que la longitud dióptrica del ojo es +60 D.

La posición del círculo de mínima confusión se obtiene sabiendo que está dióptricamente a mitad de camino entre las dos líneas focales

$$S'c = \frac{1}{2} (S'1 + S'2) = \frac{1}{2} (58 + 56) = +57 \text{ D}$$

De lo expuesto anteriormente, se deduce que el haz de luz sobre la retina será una elipse borrosa con su eje mayor vertical

4.3 CLASIFICACIÓN DEL ASTIGMATISMO OCULAR

El astigmatismo ocular generalmente es un *astigmatismo regular*, es decir la refracción para cada meridiano es igual en toda su extensión y los dos meridianos principales forman un ángulo recto. Además, en la mayoría de los casos el meridiano de máxima potencia está entre 60° y 120° (*astigmatismo según la regla*) o entre 0° y 30° (*astigmatismo contra la regla*). Cuando el meridiano de máxima potencia se halla en cualquier otra dirección y siempre que los meridianos principales estén en ángulo recto, el astigmatismo es *oblicuo*. Con muy poca frecuencia, en el astigmatismo bioblicuo, los meridianos están cruzados oblicuamente y no son perpendiculares.

Asimismo, muy raramente la curvatura de los meridianos no es regular. Es el caso del *astigmatismo irregular* en el que la potencia refractiva no es la misma en los diversos sectores de un mismo meridiano. Este astigmatismo se produce patológicamente en deformaciones corneales y no se puede compensar por medio de lentes.

Por otra parte, los astigmatismos oculares se clasifican normalmente en función de la *posición de la retina con relación a las líneas focales* del haz refractado cuando el ojo sin acomodar observa un punto objeto lejano. Los tipos de astigmatismo posibles son cinco: astigmatismo hipermetrópico simple, astigmatismo miópico simple, astigmatismo hipermetrópico compuesto, astigmatismo miópico compuesto y astigmatismo mixto (*Figura*

4.6).

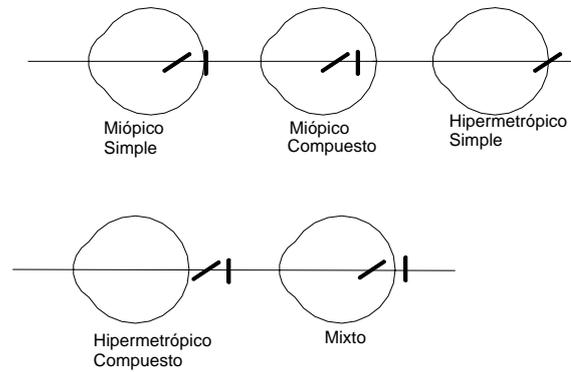


Figura 4.6. Clasificación del astigmatismo en función de la posición de las líneas focales con relación a la retina. Se muestran los 5 tipos posibles para un astigmatismo directo.

4.3.1 Astigmatismo simple

Una de las líneas focales se sitúa sobre la retina y la otra puede estar por delante o por detrás de ella, de modo que un meridiano es emétrope y el otro hipermetrópe o miope.

En el *astigmatismo hipermetrópico simple (AHS)*, la retina está en el primer plano focal. El meridiano vertical es emétrope y la imagen de un punto es una línea horizontal. El meridiano horizontal es hipermetrópe y los rayos refractados por este meridiano enfocan detrás de la retina.

En el *astigmatismo miópico simple (AMS)*, la retina está en la segunda línea focal, el meridiano vertical es miope y el horizontal emétrope. En este caso la imagen retiniana de un punto es una línea vertical.

4.3.2 Astigmatismo compuesto

Ninguna de las dos líneas focales se sitúa sobre la retina, sino que quedan por delante o por detrás de ella. El estado de refracción es totalmente hipermetrópico o miópico.

En el *astigmatismo hipermetrópico compuesto (AHC)*, la retina está delante de las dos focales y los dos meridianos principales son hipermétropes, siendo la imagen retiniana de un punto una elipse borrosa de eje mayor horizontal.

En el *astigmatismo miópico compuesto (AMC)*, la retina está detrás de las dos focales, siendo los dos meridianos principales miopes y la imagen retiniana de un punto una elipse vertical.

4.3.3 Astigmatismo mixto

Una línea focal está delante y la otra detrás de la retina, de modo que el meridiano vertical es miope y el horizontal hipermetrope. La imagen retiniana de un punto puede ser una pequeña elipse borrosa o un círculo borroso.

4.4 VISIÓN DEL OJO ASTÍGMATA SIN COMPENSAR

Una de las principales características de la visión del ojo astigmático es que generalmente la imagen retiniana de un punto objeto es una elipse borrosa, es decir el haz de rayos en la retina tendrá forma elíptica y por lo tanto en la imagen existirá algún grado de elongación debido a que hay una orientación en particular en la que se puede ver más claramente que en cualquier otra. Por supuesto, en casos particulares el haz de rayos en la retina será una línea focal o el círculo de mínima confusión, pero en general será una elipse.

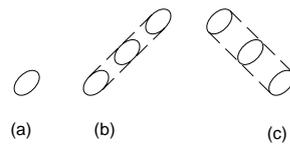


Figura 4.7. Imagen retiniana en un astigmatismo sin compensar, (a) elipse borrosa debida a un punto objeto (b) imagen borrosa de una línea paralela al eje mayor de la elipse borrosa, (c) imagen borrosa de una línea perpendicular al eje mayor de la elipse borrosa

Supóngase por ejemplo, que la imagen retiniana de cualquier punto objeto, situado a una determinada distancia del ojo, es una elipse borrosa con el eje mayor a 30° , como se muestra en la *Figura 4.7 (a)*. La imagen de una línea recta de anchura insignificante se puede deducir considerando que la línea está formada por un determinado número de puntos. Por lo tanto, su imagen retiniana será una serie de elipses borrosas superpuestas que producen difusión de luz. Si la línea está a 30° , es decir, paralela al eje mayor de la elipse borrosa, la imagen se formará como se indica en la *Figura 4.7 (b)*. Esta es claramente la orientación más favorable, en la que la borrosidad de la imagen es menos aparente. Es igualmente evidente que la borrosidad será peor en el meridiano perpendicular al eje mayor de la elipse borrosa como se indica en la *Figura 4.7 (c)*.

Si en el ejemplo anterior, en lugar de una línea se considera la imagen de una letra, se deduce que cuando las elipses borrosas son muy grandes la luz difunde a través de los trazos de la letra reduciendo el contraste por debajo del umbral fisiológico detectable, por lo que la letra no se puede reconocer.

Sin embargo, la visión del ojo astigmata sin compensar no es igual en todos los casos y depende de varios factores como son: a) la cantidad de astigmatismo, ya que las dimensiones de las líneas focales y del círculo de mínima confusión del haz astigmático son directamente proporcionales a la cantidad de astigmatismo en dioptrías, b) del tipo de astigmatismo, puesto que determina que parte de la sección transversal del haz astigmático incide en la retina y c) de la dirección del eje.

Con relación a éste último factor, la visión empeora bastante cuando el astigmatismo ocular está en un eje oblicuo debido a que en general los trazos que predominan en las letras así como en muchos objetos de nuestro entorno son las líneas verticales y horizontales. Por ejemplo, en muchas letras impresas los trazos más importantes para su reconocimiento son los verticales (b, d, h, p, y, etc...). Además, hay que tener en cuenta que en un texto impreso hay menos espacio entre las letras de una misma línea que entre líneas distintas y consecuentemente, si en la retina se sitúa la línea focal horizontal o la elipse horizontal, las letras aparecerán más juntas y se reconocerán peor. Sin embargo, las letras son más legibles cuando se distorsionan verticalmente, por lo que un astigmata preferirá situar la línea focal vertical del haz astigmático sobre la retina.

4.4.1 Aspecto de la imagen retiniana de objetos extensos en los diferentes tipos de astigmatismo

La borrosidad de la imagen retiniana depende de las características de la imagen retiniana de un punto que a su vez depende del tipo de astigmatismo. La *Figura 4.8* muestra el ejemplo de un sujeto con astigmatismo directo que observa una cruz cuando la línea focal vertical del haz astigmático está situada sobre su retina. Si los brazos de la cruz se consideran constituidos por infinito número de puntos, la imagen de cada uno de ellos en la retina será una línea vertical. La imagen del *brazo horizontal* de la cruz estará compuesta por infinitas líneas verticales correspondientes a cada punto objeto, y el patrón luminoso resultante será una ancha banda borrosa. Sin embargo, la imagen del *brazo vertical* estará compuesta por infinitas líneas verticales imagen superpuestas que se cubren entre sí de forma que la imagen final será nítida y sólo sus líneas integrantes más altas y más bajas se extenderán más allá de ella haciéndola parecer más larga y más estrecha.

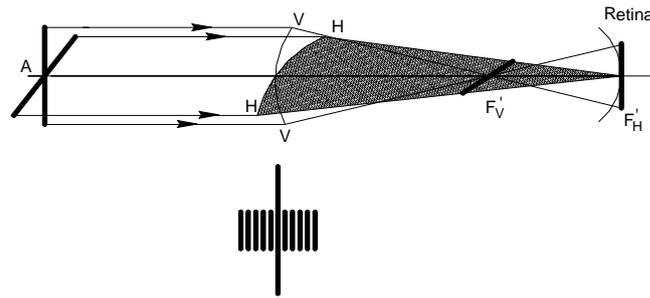


Figura 4.8. Imagen de una cruz con brazos horizontal y vertical cuando la línea focal vertical del haz astigmático está situada sobre la retina.

Al igual que en este ejemplo, en todos los casos de astigmatismo hay una orientación en la que los radios del círculo horario, test optométrico con líneas negras de igual grosor y tamaño separadas entre sí 15° , parecen más nítidos y otras direcciones en las que parecen más borrosos.

En el *astigmatismo simple* se verá más nítido el radio con la misma orientación que a) la línea focal que está sobre la retina y b) el meridiano *amétrope*. Este fenómeno de ver más oscuro o nítido en el círculo horario el radio con la orientación correspondiente al meridiano más amétrope se conoce como *paradoja astigmática*. Si el astigmatismo simple es hipermetrópico y según la regla se verá más nítido el radio próximo a la horizontal, mientras que en el astigmatismo miópico simple se verá más oscuro o nítido el radio próximo a la vertical. En el *astigmatismo compuesto* se verá más nítido el radio de igual orientación que el meridiano *más amétrope*.

En los ejemplos de la *Figura 4.9* se muestran las imágenes retinianas de diferentes tipos de astigmatismo directo cuando observan un objeto lejano como el de la *Figura 4.9* (a). Los meridianos principales del ojo están a 90° y a 180° .

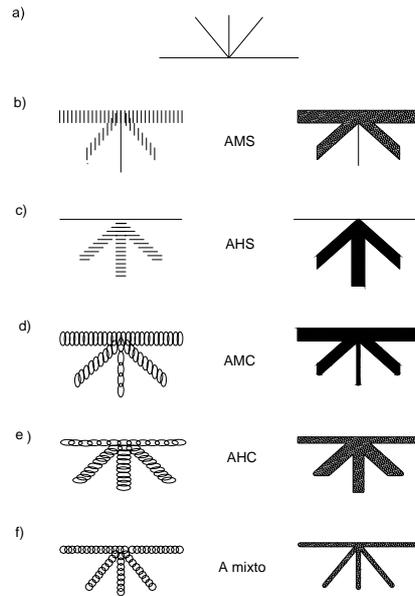


Figura 4.9. El objeto y sus correspondientes imágenes retinianas en cinco casos de astigmatismo directo o según la regla. a) Objeto en forma de abanico, b) Astigmatismo miópico simple, c) Astigmatismo hipermetrópico simple, d) Astigmatismo miópico compuesto, e) Astigmatismo hipermetrópico compuesto, f) Astigmatismo mixto

En la parte izquierda de las *Figuras 4.9* se muestra como es la imagen, para unos pocos puntos de los muchos que componen el objeto y en la parte derecha se muestra el patrón luminoso completo de la imagen retiniana. Así por ejemplo, cuando el astigmatismo es miópico compuesto (*Figura 4.9* (d)), la imagen retiniana de cada punto del objeto es una elipse borrosa vertical, mientras que la superposición de todas las elipses borrosas origina un patrón luminoso en el que las líneas que se alejan de la horizontal son cada vez más anchas.

4.4.2 Efecto de la acomodación en la visión del ojo astigmático sin compensar

Para un diámetro de pupila determinado, la borrosidad de la imagen depende de donde esté situada la retina respecto de la sección transversal del haz astigmático y de si se puede mejorar mediante la acomodación, teniendo en cuenta que en este caso la potencia del ojo se incrementa por igual en todos los meridianos.

Por lo tanto, el efecto de la *acomodación ocular* será mover todas las características del haz de rayos refractados hacia el punto principal del ojo proporcionalmente a la cantidad de acomodación ejercida, mientras que la separación dióptrica entre los diversos elementos del haz refractado permanece invariable.

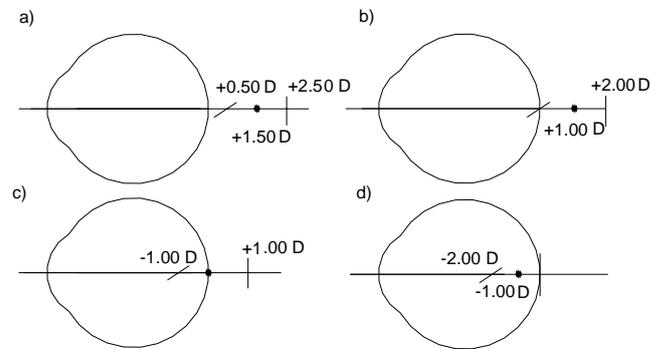


Figura 4.10. Efecto de la acomodación sobre la posición de las líneas focales astigmáticas con relación a la retina. Cantidad de acomodación a) 0,00 D, b) 0,50 D, c) 1,50 D y d) 2,50 D.

Por ejemplo, en el caso de un astigmatismo hipermetrópico compuesto de refracción ocular +0,50 D a 90° y +2,50 D a 180°, con la acomodación totalmente relajada, un punto objeto lejano forma una línea focal horizontal 0,50 D detrás de la retina, un círculo de mínima confusión 1,50 D detrás de la retina, y una línea focal vertical 2,50 D detrás de la retina (*Figura 4.10 (a)*). Si acomoda sucesivamente 0,50, 1,50 y 2,50 D, en cada caso situará sobre la

retina: la línea focal horizontal, el círculo de mínima confusión, y la línea focal vertical respectivamente (*Figura 4.10* (b), (c), y (d)). En los tres casos la separación entre los elementos del haz astigmático no cambia con la acomodación.

En el *astigmatismo hipertrópico simple o compuesto* las líneas focales están situadas detrás de la retina cuando el sujeto observa un punto objeto lejano y estas líneas focales se mueven más lejos todavía cuando, sin acomodar, mira un punto objeto próximo. Sin embargo, siempre que el sujeto tenga disponible suficiente acomodación puede desplazar las líneas focales hacia el punto principal del ojo, de tal manera que puede situar sobre su retina la sección transversal más favorable del haz astigmático.

Ejemplo:

Un sujeto tiene un astigmatismo hipertrópico simple de +2,00 D en el meridiano horizontal. Observa una cruz con brazos vertical y horizontal situada a 1 metro del ojo. Señalar la posición de las líneas focales con relación a la retina y la apariencia de la cruz si acomoda a) 1 D b) 2 D y c) 3 D.

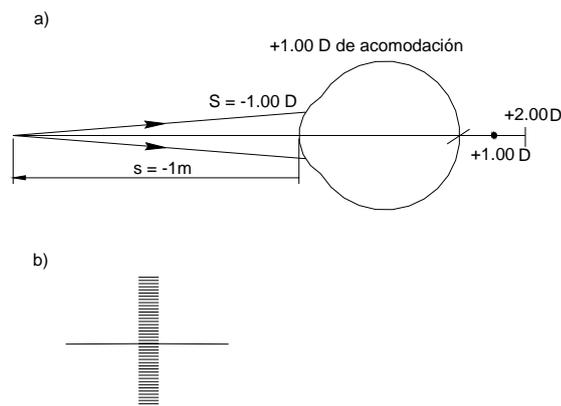


Figura 4.11. Posición de las líneas focales (a) y apariencia de la cruz (b) cuando el sujeto acomoda 1 D.

a) Cuando el sujeto acomoda +1 D solamente neutraliza el efecto de los rayos que llegan divergentes al ojo (-1 D) procedentes del objeto situado a 1 metro, pero no desplaza la posición de las líneas focales correspondientes al ojo sin acomodar (*Figura 4.11*). En este caso, los meridianos verticales forman una línea focal horizontal situada en la retina, los meridianos horizontales una línea focal vertical a +2 D detrás de la retina y el círculo de mínima confusión se sitúa a +1 D detrás de la retina. Por lo tanto, con 1 D de acomodación la imagen de la cruz tendrá el brazo horizontal nítido y el vertical se verá borroso.

b) Si acomoda 2 D, quiere decir que gasta 1 D en neutralizar los rayos divergentes (-1 D) procedentes del objeto y que con la otra dioptría sitúa el círculo de mínima confusión sobre la retina. La imagen de la cruz tendrá los dos brazos igualmente borrosos (*Figura 4.12 a*).

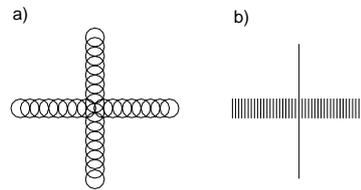


Figura 4.12. Apariencia de la cruz cuando el ojo acomoda a) 2 D y b) 3 D.

c) Si acomoda 3 D, la línea focal vertical se lleva sobre retina. Por lo tanto, el brazo vertical de la cruz se verá nítido y el horizontal borroso (*Figura 4.12 b*)

En principio la mejor posición para enfocar corresponde a la zona entre las dos líneas focales, pero la posición exacta depende de la naturaleza del objeto observado. Por ejemplo, el plano del círculo de mínima confusión puede no ser la mejor posición para enfocar un objeto que consiste básicamente en líneas paralelas a uno de los meridianos principales del ojo.

Suponiendo que se sitúe sobre la retina el círculo de mínima confusión, su diámetro z viene dado por

$$z = d_p \cdot \frac{Ast}{S'_1 + S'_2}$$

y en este caso, el valor medio de las dos vergencias imagen S'_1 y S'_2 es igual a la longitud dióptrica R' del ojo. Así

$$z = d_p \cdot \frac{Ast}{2.R'}$$

Sin embargo, en el caso de una ametropía esférica el diámetro del círculo de difusión en el ojo desacomodado se obtiene de

$$cd = d_p \cdot \frac{R}{R'}$$

Es decir, para el mismo diámetro pupilar, el tamaño del círculo de mínima confusión producido por un determinado astigmatismo es solamente la mitad del tamaño correspondiente al círculo de difusión producido por una ametropía esférica del mismo valor dióptrico. Por consiguiente, sí en este caso el círculo de mínima confusión se sitúa sobre la retina la borrosidad de la imagen será menor en el sujeto astigmata que en el amétrope esférico. Así por ejemplo, una agudeza visual de 0,33 indicaría una ametropía esférica alrededor de 1,00 D o un astigmatismo de aproximadamente 2,00 D. Es decir, se puede estimar la cantidad de astigmatismo doblando la cantidad de ametropía esférica, suponiendo que sobre la retina se situase la parte más favorable del haz astigmático.

En el *astigmatismo miópico simple o compuesto* la visión lejana no se puede mejorar mediante la acomodación, ya que al igual que en la miopía esférica la borrosidad de la imagen retiniana aumenta si se incrementa la potencia del ojo. En este tipo de astigmatismo la visión que se puede esperar es aproximadamente la misma que en una ametropía esférica con un valor igual al

de la refracción ocular media del astigmatismo, es decir el valor medio de los errores refractivos en los dos meridianos principales.

Sin embargo, en visión próxima el astigmata miópico puede elegir la parte del haz astigmático que sitúa en la retina simplemente moviendo el objeto a la posición apropiada.

Por ejemplo, en un astigmatismo miópico compuesto de 3 D en el meridiano horizontal y 1 D en el meridiano vertical la línea focal vertical está 3 D delante de la retina y la línea focal horizontal 1 D delante de la retina en visión lejana (*Figura 4.13 (a)*). Pero cuando un punto objeto se observa a una distancia de 50 cm, la vergencia incidente en la superficie ocular será de -2 D y las líneas focales y el círculo de mínima confusión se moverán 2 D hacia atrás (a la derecha). Así, en ausencia de acomodación, el círculo de mínima confusión se sitúa sobre la retina, siendo ésta la mejor opción para ver la imagen de un punto (*Figura 4.13 (b)*).

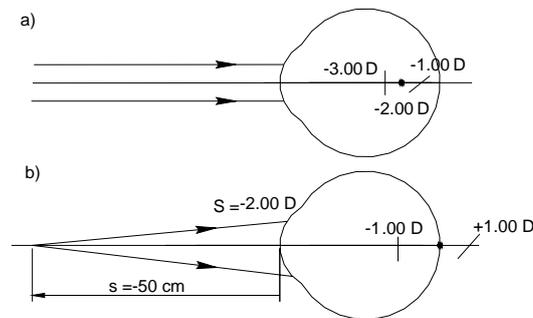


Figura 4.13. Posición de las líneas focales en un astigmatismo miópico compuesto a) en visión lejana, b) cuando observa un punto objeto a 50 cm, sin acomodar.

En el *astigmatismo mixto* sólo una línea focal está detrás de la retina, y por ello es más difícil mejorar la visión mediante la acomodación, ya que dependerá de la posición del círculo de mínima confusión que puede estar enfrente o

detrás de la retina, según que la refracción ocular media sea del lado miópico o hipermetrópico.

4.5 TAMAÑO DE LA IMAGEN RETINIANA DE OBJETOS EXTENSOS EN EL OJO ASTIGMÁTICO SIN COMPENSAR

La imagen retiniana borrosa de un objeto extenso se calcula igual que en el caso de las ametropías esféricas, aunque de forma separada para cada meridiano principal. Primero se determina el *tamaño básico* de la imagen retiniana, y después, para cada meridiano principal, las dimensiones de las elipses individuales borrosas que componen la imagen.

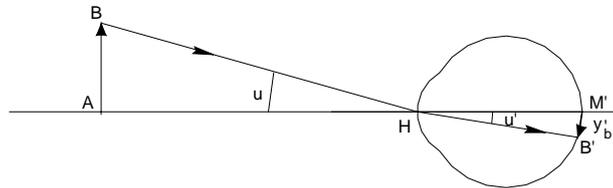


Figura 4.14. Tamaño básico de la imagen retiniana borrosa.

El tamaño básico de la imagen retiniana borrosa se obtiene ignorando los efectos del desenfoque, es decir, imaginando la pupila infinitamente pequeña. En la *Figura 4.14* un objeto OA apoyado en el eje visual subtende un ángulo u en el punto principal del ojo, que también se toma como centro de la pupila. El rayo central o principal se refracta en la superficie reducida del ojo haciendo un ángulo u' con el eje visual tal que:

$$u' = \frac{u}{n'}$$

La intersección de este rayo con la retina determina el extremo inferior de la imagen retiniana básica, el extremo superior se encuentra en el centro de la fovea, en M' . Por lo tanto, el tamaño básico de la imagen retiniana será

$$y'_b = -r' \cdot u'$$

sustituyendo u'

$$y'_b = -u \cdot \frac{r'}{n'} \quad (u \text{ en radianes})$$

El análisis de esta ecuación muestra que y'_b es independiente de los meridianos principales, lo que significa que en el ojo astigmático sin compensar la imagen retiniana borrosa de un objeto será del mismo tamaño en los dos meridianos principales, aunque será más borrosa en uno de los dos meridianos. En un modelo de ojo más complejo, como es el de tres superficies, habrá pequeñas diferencias en los tamaños de las imágenes retinianas en los dos meridianos principales del ojo astigmático sin compensar porque la pupila de entrada estará en posiciones ligeramente diferentes en cada meridiano, pero este no es el caso del modelo de ojo reducido donde la pupila está en la superficie reducida y además la imaginamos infinitamente pequeña.

Ejemplo:

Un ojo astigmático en estado relajado, de potencias $F_{180} = +61$ D y $F_{90} = +64$ D, longitud axial de 22,26 mm y diámetro pupilar de 4 mm, observa a la distancia de 6 metros una letra E que subtende 15 minutos de arco. Calcular las dimensiones principales de la imagen retiniana borrosa.

$$u = \frac{15}{60} \times \frac{\pi}{180} = 0,0043 \text{ radianes}$$

$$y'_b = -0,0043 \cdot \frac{22,26}{1,336} = -0,071 \text{ mm en longitud y anchura}$$

La longitud dióptrica del ojo es:

$$R' = n'/r' = 1,336 / 22,26 = +60,00 \text{ D}$$

Por lo tanto para cada punto objeto los meridianos horizontales de potencia $F_{180} = +61 \text{ D}$ formarán una línea focal vertical a -1 D delante de la retina, y los meridianos verticales de potencia $F_{90} = +64 \text{ D}$ formarán una línea focal horizontal a -4 D delante de la retina. Sobre la retina cada punto objeto estará representado como una elipse borrosa con su eje mayor vertical.

Para determinar las dimensiones de las elipses borrosas individuales que componen la imagen se utiliza la misma fórmula que en las ametropías esféricas permite calcular el tamaño de los círculos de difusión, pero aplicada a cada meridiano principal.

	<i>a través de 180°</i>	<i>a través de 90°</i>
r'	22,26	22,26
$R' = n'/r'$	+60 D	+60 D
$R = R' - F_0$	-1,00 D	-4,00 D
d_p	4 mm	4 mm
$cd = d_p \cdot \frac{R}{R'}$	-0,066 mm	-0,266 mm

Cada punto objeto forma una elipse retiniana borrosa que mide aproximadamente $0,26 \times 0,06 \text{ mm}$, con el eje mayor paralelo al meridiano de 90° . Si cada punto de la imagen retiniana básica, de $0,071 \text{ mm}$ de tamaño, se reemplaza por una elipse de las dimensiones calculadas, en este ejemplo es evidente que la letra no se puede reconocer (*Figura 4.15*).

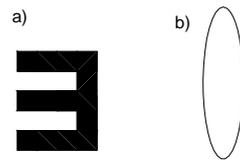


Figura 4.15. Dibujo de a) la imagen retiniana básica de la letra y b) la elipse borrosa correspondiente a un solo punto del objeto.

5 COMPENSACIÓN ÓPTICA DEL ASTIGMATISMO

La lente oftálmica que compensa al ojo astigmático en visión lejana debe ser también astigmática de tal manera que sus meridianos principales estén alineados con los del ojo y que sus potencias principales sean tales que los focos imagen coincidan en cada caso con el punto remoto correspondiente a cada uno de los dos meridianos principales del ojo.

5.1 LENTES ASTIGMÁTICAS

Una lente o sistema astigmático es aquel que al menos tiene una superficie astigmática. Las lentes más simples de este tipo se llaman *lentes plano-cilíndricas* y tienen una superficie plana y la otra en forma de cilindro convexo o cóncavo, como se indica en la *Figura 5.1*, por lo que estas lentes pueden ser cilindros plano-convexos o cilindros plano-cóncavos. Las líneas discontinuas de la figura indican el cilindro del que forma parte la superficie curva de la lente y el eje del cilindro. Cualquier meridiano paralelo al eje del cilindro tiene la curvatura mínima, cero en este caso y por lo tanto potencia cero. Sin embargo, los meridianos de máxima curvatura son perpendiculares al eje y son conocidos como “meridianos de potencia”. Consecuentemente, una lente cilíndrica

refracta los rayos de luz en un plano perpendicular al eje del cilindro y deja inalterados los rayos en el plano de su eje.

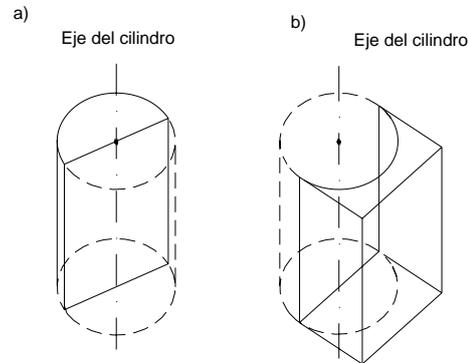


Figura 5.1. a) Lente cilíndrica plano-convexa, b) Lente cilíndrica plano-cóncava.

Otro tipo de lentes son las formadas por una superficie esférica y otra cilíndrica y se denominan *lentes esfero cilíndricas*. Por ejemplo

$$+1,50 \text{ DE} / +2,00 \text{ DC eje } 90^\circ$$

significa que tiene una superficie esférica de $+1,50 \text{ D}$ combinada con una superficie cilíndrica de $+2,00 \text{ D}$ a 90° . Este tipo de lentes astigmáticas fueron las primeras que se usaron para compensar el astigmatismo ocular y la prescripción todavía se escribe en esta forma esfero-cilíndrica.

Estas lentes esfero-cilíndricas tienen dos meridianos principales, correspondientes a las potencias mínima y máxima, cada uno respectivamente paralelo y perpendicular al eje del cilindro. A lo largo del meridiano paralelo al eje del cilindro la única potencia de la lente es aquella de la esfera (E), mientras que en el meridiano perpendicular al eje, la potencia de la lente es la suma de la esfera y el cilindro $E + C$.

En general, cualquier superficie astigmática, incluida la ocular, se puede considerar que combina un elemento de potencia esférica con un elemento de potencia cilíndrica. Esto es ópticamente equivalente a una lente esfero-cilíndrica, siendo, siempre, la potencia del elemento cilíndrico la diferencia entre las dos potencias principales.

Puesto que la determinación del error refractivo se obtiene en términos de lentes esféricas y cilíndricas, y además la prescripción compensadora se escribe como una potencia esférica combinada con una potencia cilíndrica, es necesario especificar la orientación del eje del cilindro compensador. Para la *notación del eje*, tanto de una lente como de un meridiano determinado del ojo, existen diferentes sistemas. El más empleado de todos es la notación estándar (*Figura 5.2*), donde el meridiano se especifica por el ángulo antihorario que forma con la horizontal. El punto de vista es el del observador situado frente al paciente. Para ambos ojos la notación es la misma.

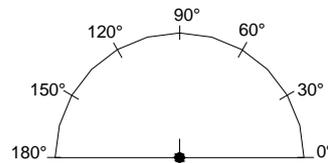


Figura 5.2. Sistema de notación de eje estándar para describir la orientación de los meridianos del ojo y el eje del cilindro en la prescripción de la compensación.

5.2 COMPENSACIÓN EN LOS DIFERENTES TIPOS DE ASTIGMATISMO

Cuando el astigmatismo es simple, la compensación se hace con lentes cilíndricas solamente, y cuando es compuesto con lentes esfero-cilíndricas, de manera que las dos focales se sitúen en la retina.

Si el astigmatismo simple se considera como un ojo emétrope al que se le ha añadido una hipotética lente cilíndrica (positiva o negativa), la lente compensadora, situada en esa misma posición, será una lente cilíndrica de signo contrario a la lente hipotética, pero del mismo valor dióptrico y orientación. Así, por ejemplo, un astigmatismo miópico de una dioptría por exceso de refringencia en el meridiano vertical se compensará con un cilindro negativo con el eje orientado a 180° , ya que este cilindro tendrá el meridiano de potencia a 90° y anulará el exceso de refracción del meridiano vertical.

El astigmatismo simple se compensará con cilindros cóncavos o negativos cuando se trate de un astigmatismo miópico, y con cilindros convexos o positivos si es hipermetrópico. El eje de la lente cilíndrica será perpendicular al meridiano amétrope de forma que su meridiano de potencia sea paralelo al meridiano que tiene que compensar.

Por ejemplo, cuando un sujeto con astigmatismo miópico simple ve más nítido el radio vertical (90°) del círculo horario, quiere decir que su meridiano miope tiene esa orientación y que por lo tanto, la lente cilíndrica compensadora deberá llevar el eje a 180° .

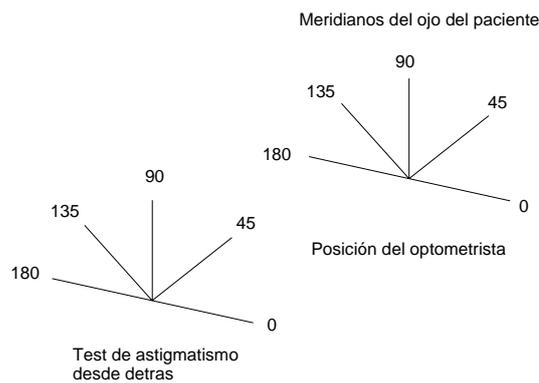


Figura 5.3. Vista tridimensional del test de astigmatismo y de la notación de los meridianos oculares. El test visto por detrás tiene los mismos meridianos que el ojo.

Supóngase otro caso en el que un ojo con AMS tiene su meridiano principal más potente orientado a 45° , según la notación de eje estándar en la que los meridianos se numeran en *sentido antihorario* desde la horizontal (*Figura 5.3*). El eje del cilindro negativo compensador deberá estar por lo tanto a 135° . Teniendo en cuenta que la línea focal sobre la retina es paralela al meridiano de 45° , ésta debe ser también la dirección de la línea del círculo horario que se vea más nítida. No obstante, desde la posición del examinador, entre el paciente y el test, la línea del círculo horario que es paralela al meridiano de 45° del paciente, está situada a 45° en *sentido horario* desde la horizontal. Por lo tanto, cuando el círculo horario se observa directamente sus líneas o meridianos necesitan una numeración inversa a la de los meridianos del ojo (*Figura 5.4*).

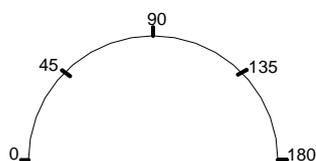


Figura 5.4. Numeración del test astigmático en sentido horario desde la horizontal, cuando se observa directamente desde una posición entre el paciente y el test.

El astigmatismo compuesto se puede considerar como un ojo amétrope al que se le ha añadido una hipotética lente cilíndrica. En este caso los dos meridianos se encuentran desenfocados con relación a la retina y la compensación habrá de realizarse con una lente esférica más una cilíndrica que neutralice esa hipotética lente cilíndrica.

Si el astigmatismo es miópico compuesto, se compensará con una lente esférica negativa que desplace las dos líneas focales, situando solamente una de ellas sobre la retina, y con una lente cilíndrica negativa que sitúe la otra focal también sobre la retina. Si el astigmatismo es hipermetrópico compuesto se compensará con una lente esférica positiva y un cilindro positivo.

Por ejemplo, para compensar con una lente de contacto un astigmatismo miópico compuesto de 2,00 D a 90° y 1,00 D a 180° se necesita:

a) una lente esférica de -1,00 D que desplace las dos líneas focales 1 D hacia atrás, de tal manera que la línea focal vertical correspondiente al meridiano horizontal se sitúe sobre la retina mientras que la línea focal horizontal se queda a -1,00 D de distancia dióptrica de ella (*Figura 5.5 a*),

b) un cilindro de -1,00 D con el eje a 180° para llevar la línea focal del meridiano vertical sobre la retina (*Figura 5.5 b*).

La lente esfero-cilíndrica correspondiente será

-1,00 DE / -1,00 DC eje 180.

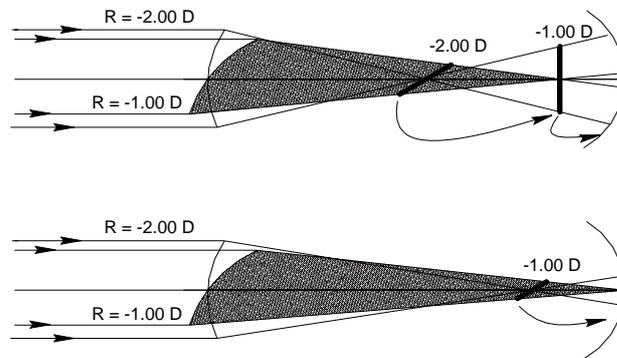


Figura 5.5. Compensación de un AMC de 2,00 D a 90° y 1,00 D a 180°. a) Efecto de una lente esférica de -1,00 D, b) efecto de una lente cilíndrica de -1,00 D eje a 180°.

El astigmatismo mixto se podría compensar con dos cilindros de ejes perpendiculares; donde cada cilindro neutralizaría el meridiano correspondiente. Sin embargo, esta manera de proceder no se emplea en la

práctica y la compensación se hace con una lente esfero-cilíndrica que es el equivalente a la combinación de dos cilindros.

Por ejemplo, considerando nula la distancia de vértice, un astigmatismo mixto de -1,00 D en el meridiano de 180° y de +1,00 D a 90° se puede compensar de dos maneras:

a) Con una lente esférica de +1,00 D que neutralice el meridiano hipermetrope, pero que deja miope de 2,00 D el otro meridiano. Éste se puede compensar con un cilindro de -2,00 D con el meridiano de potencia a 180°, es decir, con el eje a 90°.

b) Con una lente esférica de -1,00 D que compense el meridiano principal miope, en tanto que el otro meridiano se queda hipermetrope de +2,00 D. Éste se puede compensar con un cilindro de +2,00 D con el meridiano de potencia a 90° y en consecuencia, el eje a 180°.

5.3 POTENCIA DE LALENTE OFTÁLMICA A UNA DETERMINADA DISTANCIA DE VÉRTICE

La potencia de la lente compensadora situada a una distancia de vértice d se calcula igual que en el caso de las ametropías esféricas, pero teniendo en cuenta que la compensación es diferente para cada uno de los meridianos principales, por lo tanto

$$F_{L,\alpha} = \frac{R_\alpha}{1 + d.R_\alpha}$$

$$F_{L,\alpha+90} = \frac{R_{\alpha+90}}{1 + d.R_{\alpha+90}}$$

La refracción ocular (R), en los meridianos principales de la superficie astigmática del ojo, se obtiene a partir de la ecuación $R = R' - F_o$, en la que la longitud dióptrica del ojo reducido (R') es la misma en los dos meridianos,

pues la longitud axial del ojo es independiente de aquellos. Por lo tanto, en el meridiano α

$$R_{\alpha} = R' - F_{o,\alpha}$$

y en el meridiano $\alpha + 90^{\circ}$

$$R_{\alpha+90} = R' - F_{o,\alpha+90}$$

Es decir, el *astigmatismo ocular* se calcula por la diferencia entre las potencias refractivas de los meridianos principales o bien, por la diferencia entre las distancias dióptricas de los puntos remotos de estos dos meridianos medidas a partir del plano principal correspondiente:

$$Ast = F_{o,\alpha} - F_{o,\alpha+90} = R_{\alpha} - R_{\alpha+90}$$

Ejemplo

Un ojo astigmático tiene como potencias principales $F_{30} = +62$ D y $F_{120} = +64$ D. Su distancia dióptrica R' es +59 D. Calcular sus refracciones oculares y las potencias principales de la lente compensadora a una distancia de vértice de 15 mm.

	<i>meridiano 30°</i>	<i>meridiano 120°</i>
R'	+59 D	+59 D
F_o	+62 D	+64 D
$R = R' - F_o$	-3 D	-5 D

Esta refracción ocular obtenida en cada uno de los meridianos principales del ojo se puede expresar de forma esfero-cilíndrica como:

-3,00 DE / -2,00 DC eje 30°

Al igual que en el caso de las ametropías esféricas, la refracción ocular R de un ojo astigmata desacomodado representa la potencia de la lente compensadora situada en contacto con el ojo.

Para calcular las potencias de los meridianos principales de la lente compensadora a una distancia de vértice d del ojo se emplea el mismo procedimiento que se utilizó para las ametropías esféricas.

	<i>meridiano 30°</i>	<i>meridiano 120°</i>
R	-3 D	65 -5 D
r	-333,3 mm	-200 mm
d	15 mm	15 mm
$f_L = r + d$	-318,3 mm	-185 mm
F_L	-3,14 D	-5,40 D

Expresado en forma esfero-cilíndrica, la potencia de la lente compensadora a 15 mm del ojo será: -3,14 DE / -2,26 DC eje 30°

En forma abreviada, -3,14 / -2,26 x 30

Este procedimiento se puede utilizar de forma inversa para determinar la refracción ocular, dada la refracción en la lente y la distancia de vértice.

Por otra parte, cuando se produce un cambio en la distancia de vértice de las lentes, si las potencias son relativamente elevadas es necesario modificar la compensación.

Por ejemplo: Para una prescripción de +10,00 / +5,00 x 60 a 16. ¿ Que modificación de la potencia necesitará a 12 mm?

En este caso, el plano de la lente se mueve 4 mm más cerca del punto remoto del ojo, por lo tanto la longitud focal de la lente se debe reducir en esta cantidad.

	<i>meridiano 60°</i>	<i>meridiano 150°</i>
Potencia original F_L	+10 D	+15 D
f_L	+100 mm	+66,66 mm
-4 mm	-4 mm	-4 mm
f_L nueva	+96 mm	+62,66 mm
Potencia modificada	+10,40 D	+15,95 D

Estas potencias principales corresponden a la lente

$$+10,40 / +5,55 \times 60$$

Redondeando a las 0,25 D más próximas, la prescripción modificada será

$$+10,50 / +5,50 \times 60 \text{ a } 12 \text{ mm}$$

5.4 TAMAÑO DE LA IMAGEN RETINIANA EN EL OJO ASTIGMÁTICO COMPENSADO

El tamaño de la imagen retiniana compensada se calcula teniendo en cuenta que, en primer lugar la lente forma una imagen real o virtual, independientemente del ojo, de acuerdo con la ley de los puntos conjugados y en segundo lugar, que esta imagen actúa como un objeto para el ojo. Por lo

tanto, la ecuación que se obtiene es la misma que en el caso de las ametropías esféricas,

$$y'_c = -f'_L \times u_0 \times \frac{R}{R'} \quad (u_0 = \text{ángulo que forma el objeto con el eje} \\ \text{óptico en el plano de la lente compensadora})$$

pero será necesario aplicarla a los dos meridianos principales del ojo astigmata.

Ejemplo:

Un ojo reducido con astigmatismo hipermetrópico compuesto de +3,50 D en el meridiano horizontal y de +1,00 D en el meridiano vertical, compensado con un lente delgada a 12 mm, observa un cuadrado lejano con lados verticales y horizontales paralelos a los meridianos principales del ojo, que subtienden cada uno 3°. La longitud dióptrica ocular es de +58 D y el diámetro pupilar de 4 mm. Calcular a) las dimensiones principales de la imagen retiniana borrosa y realizar un esquema de su apariencia, b) calcular el tamaño de la imagen retiniana compensada. Asumir que el eje visual es perpendicular al plano del cuadrado.

a) Para calcular el tamaño básico de la imagen retiniana sin compensar el ángulo se debe expresar en radianes,

$$u = 3 \times \pi/180 = 0,052 \text{ radianes}$$

$$y'_b = -\frac{u}{R'} = -\frac{0,052 \cdot 1000}{58} = 0,896 \text{ mm en longitud y anchura}$$

Las dimensiones de las elipses borrosas son las siguientes,

	<i>a través de 180°</i>	<i>a través de 90°</i>
$R' = n'/r'$	+58 D	+58 D
R	+3,5 D	+1 D
d_p	4 mm	4 mm
	<i>a través de 180°</i>	<i>a través de 90°</i>
$cd = d_p \cdot \frac{R}{R'}$	0,241 mm	0,068 mm

Sobre la retina cada punto del objeto forma una elipse retiniana borrosa que mide aproximadamente 0,241 x 0,068 mm con el eje mayor horizontal. La apariencia de la imagen se muestra en la *Figura 5.6*.

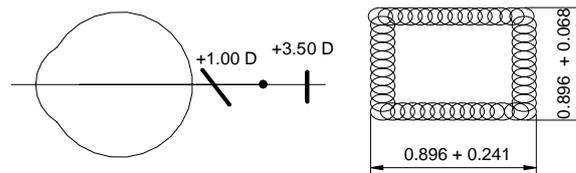


Figura 5.6. Representación esquemática de la imagen retiniana borrosa del cuadrado que ve un astigmatia hipertrópico compuesto de +3,50 D a 180° y +1,00 D a 90°.

b) Calculando la potencia de la lente se puede conocer el tamaño de la imagen retiniana compensada y'_c . Por lo tanto,

	<i>meridiano a 180°</i>	<i>meridiano a 90°</i>
R	+3,5 D	+1 D
r	285,7 mm	1000 mm
d	12 mm	12 mm
$f_L = r + d$	297,7 mm	1012 mm
F_L	+3,35 D	+0,98 D
$SM = R / F_L$	1,044	1,020
$y'_c = SM \times y'_b$	0,936 mm	0,913

La imagen retiniana con la compensación es nítida, pero de mayor tamaño en comparación con la imagen en el ojo sin compensar. Sin embargo, lo más importante en este caso es la diferencia en los tamaños de las imágenes en los dos meridianos principales, de tal manera que la imagen nítida en el ojo compensado es de forma rectangular, más que cuadrada, con el lado horizontal más largo.

Un astígmata como el del ejemplo, al principio de llevar la compensación nota los cambios de forma. Sin embargo la mayoría de los sujetos enseguida se adaptan a los cambios del estímulo y los objetos se ven correctamente proporcionados.

6 ACOMODACIÓN Y VISIÓN PRÓXIMA

La acomodación es la propiedad que tiene el ojo de enfocar a diferentes distancias. En el ojo emétrepe los rayos paralelos procedentes de un objeto en el infinito son enfocados sobre la retina; si el objeto se coloca más cerca (en A), la imagen se formará en el foco conjugado (A') situado detrás de la retina, y en la retina se formará un gran círculo de difusión que sólo permitirá ver una imagen borrosa. El mecanismo por el cual el poder de convergencia del ojo aumenta para ver nítidamente A, desplazando A' hasta M' , se denomina acomodación (*Figura 6.1*).

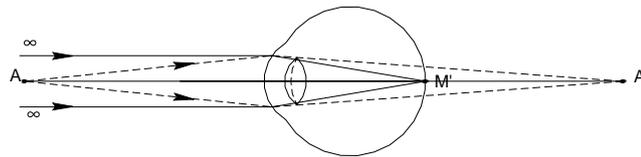


Figura 6.1. Enfoque del ojo para un objeto próximo A.

En el ojo joven la potencia refractiva se modifica mediante el cambio de curvatura de la lente del cristalino.

6.1 MECANISMO DE LA ACOMODACIÓN

Todavía se discute la naturaleza exacta del mecanismo de la acomodación, pero sí se coincide en lo fundamental, que es un aumento de la curvatura del cristalino que afecta sobre todo a la cara anterior.

En estado relajado, el radio de curvatura de la cara anterior del cristalino es de 11 mm, mientras que durante la acomodación puede disminuir a 5 o 6 mm; esta variación de la forma aumenta el poder convergente de ojo de modo que el foco puede desplazarse en la medida necesaria. Al acomodar un ojo joven hay un acortamiento de la distancia focal que corresponde a un aumento de la potencia del ojo, pasando ésta de 60 dioptrías a 70 D.

En la *Figura 6.2* se compara el enfoque para visión próxima y el enfoque para visión lejana.

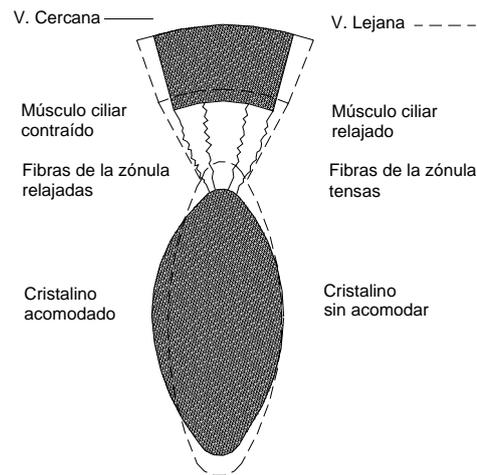


Figura 6.2. Proceso de la acomodación en el músculo ciliar y cristalino.
Zona rayada y línea continua: enfoque para visión próxima. Línea discontinua: enfoque para visión lejana.

En el *enfoque para visión próxima* el músculo ciliar se contrae, las fibras de la zónula se relajan y la cápsula del cristalino está distendida, de manera que la lente adopta una forma esferoidal, con lo que aumenta su poder refractivo.

En el *enfoque para visión lejana*, el músculo ciliar está relajado, las fibras de la zónula tensas, y el cristalino aplanado con forma elíptica disminuye su poder de refracción.

6.1.1 Teorías de la acomodación

Teoría de Helmholtz

Helmholtz consideró que el cristalino era elástico y que en estado normal se mantenía distendido y aplanado por la tensión del ligamento suspensor (la zónula). En el acto de la acomodación la contracción del músculo ciliar disminuía el círculo formado por los procesos ciliares, relajando la zónula. El cristalino aliviado de la tensión a que había estado sometido, adoptaba una forma más esférica, con incremento del espesor y disminución del diámetro, mostrando al mismo tiempo una prominencia hacia delante en el centro y un aplanamiento relativo en la periferia.

Casi todos los criterios modernos sobre la acomodación se basan en esta teoría, con las consiguientes modificaciones introducidas.

Los conceptos generales desarrollados por Hess, Gullstrand, Fincham y otros a partir de la teoría de Helmholtz han sido ampliados y modificados recientemente por Weale y las importantes aportaciones teóricas y experimentales de Fisher.

Teoría de Gullstrand

Gullstrand demostró el mecanismo intra-capsular de la acomodación. Cuando el cristalino acomoda, sus fibras se desplazan unas sobre otras aumentando el índice de refracción, a este mecanismo lo llamó *acomodación interna* y a los cambios de curvatura de las capas externas, *acomodación externa*.

El aumento del índice de refracción representa alrededor de un tercio de la amplitud de acomodación.

Teoría de Fincham

Fincham demostró que el cristalino no es elástico, sino plástico y por tanto sin forma propia. La cápsula es elástica e impone a la sustancia plástica del cristalino su forma propia.

La cápsula de cristalino no tiene el mismo espesor en todo su contorno, y el hecho de que sea más gruesa o espesa en la periferia que en la región axial explica la deformación conoide; la periferia donde es gruesa la cápsula ejerce una fuerte presión mientras que en la zona axial donde es delgada permite al contenido bombear hacia delante. Sin embargo, actualmente esto es cuestionable.

Teoría de Weale (1.962)

Weale señala que la sustancia del cristalino tiene cierta elasticidad propia. La cápsula elástica impone su forma natural conoidal sobre la sustancia del cristalino, que resiste a las fuerzas elásticas de la cápsula. Luego la sustancia interior del cristalino es también algo elástica y no sólo plástica.

Teoría de Fisher

Fisher ha demostrado que la sustancia del cristalino es elástica, y que lo que determina la forma del conjunto es la interacción de la elasticidad de la cápsula y de la sustancia de la lente.

Fisher pudo medir las propiedades físicas de la sustancia del cristalino y de su cápsula en diversas edades a fin de averiguar lo que sucede en la presbicia. Observó que existe una debilidad progresiva de la capacidad de la cápsula para deformar la sustancia del cristalino a partir de la forma desacomodada que tiende a adoptarse espontáneamente. Los tres factores de

envejecimiento a los que responsabiliza Fisher son: una disminución del módulo de elasticidad de la cápsula, un aumento en el de la sustancia de cristalino y un aplanamiento de éste en su conjunto.

La *versión moderna de la teoría de Helmholtz* sostiene que durante la acomodación se contrae el músculo ciliar, se relaja el ligamento suspensor y la cápsula elástica del cristalino puede deformar sin impedimento alguno la sustancia del cristalino para darle una forma acomodada más esférica, quizá conoidea, a la que se resiste su elasticidad natural. Con el aumento de la edad, y aunque está intacta la potencia del músculo ciliar, las alteraciones de la cápsula merman su capacidad para deformar la sustancia del cristalino, cada vez más resistente.

Teoría de Henderson

Está basada en la dualidad anatómica del músculo ciliar, músculo liso que tiene dos grupos de fascias: el grupo de Rouget-Müller, constituido por fibras circulares que conforman un verdadero esfínter; cuando se contrae desplaza la zónula hacia el eje óptico que se relaja, permitiendo actuar a la elasticidad capsular. El grupo de Brucke, constituido por fascículos radiales que mantienen tensa la zónula.

A esta dualidad anatómica le corresponderá una doble inervación. El *parasimpático* enerva el músculo de Müller y el *simpático* el músculo de Brucke.

Se ha aceptado durante mucho tiempo que solo el sistema parasimpático por medio del tercer par participaba en el mecanismo de la acomodación. Se sabe ahora que mientras la acomodación para la visión próxima se produce por una contracción del músculo de Müller provocada por el parasimpático, la acomodación activa para la visión lejana se realiza por medio de la contracción del músculo de Brucke, que tiene una acción antagónica para el músculo de Müller y está mediado por el simpático. Experimentalmente se ha encontrado que la estimulación del simpático produce un aplanamiento del cristalino.

Parece, pues, que en la acomodación existiría una actividad mutua antagonista; un mecanismo simpático para enfoque de la visión lejana y otro parasimpático para la visión próxima. Esta teoría sitúa a la acomodación en

paralelismo con la actividad pupilar que muestra una dilatación y una contracción recíprocas, activas ambas, en las que el mecanismo parasimpático de miosis predomina con mucho sobre el componente simpático de midriasis.

6.2 MODIFICACIONES DEL OJO DURANTE LA ACOMODACIÓN

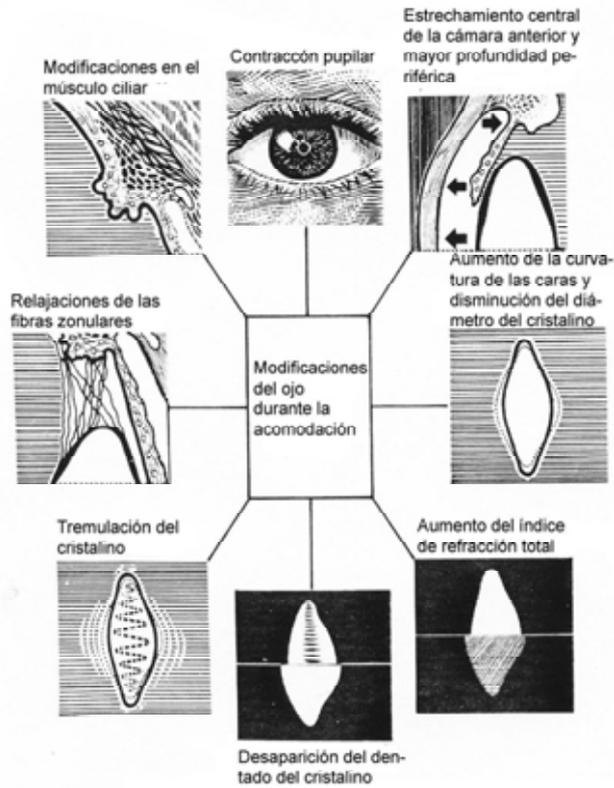


Figura 6.3. Modificaciones del ojo durante la acomodación

Las modificaciones que ocurren en el ojo durante la acomodación se muestran en la *Figura 6.3* y son las siguientes:

a) La pupila se contrae al mirar un objeto próximo. Su función es actuar como un diafragma que suprime el aumento relativo de luz que entra en el ojo a partir de los objetos próximos y, por lo tanto, disminuye los círculos de difusión. También disminuye las aberraciones al obturar las porciones externas del cristalino. Esta contracción pupilar desencadenada por la acomodación es más lenta que la producida por la luz.

b) Disminución de la profundidad de la cámara anterior por el centro. El borde pupilar se desplaza hacia delante aproximadamente 0,4 mm para una acomodación de 7 dioptrías. Sin embargo, por su parte periférica la cámara anterior sufre un aumento de la profundidad.

c) Modificaciones en el cristalino

- En sus superficies refractivas:

En su cara anterior experimenta un cambio de posición y un cambio de forma.

Referente a la posición, se desplaza hacia la córnea entre 0,3 y 1 mm. En cuanto a la forma su radio de curvatura disminuye durante la acomodación. Este aumento de curvatura no es uniforme y afecta principalmente a la región central, donde se produce una deformación conoide.

En la cara posterior el cristalino sufre menos cambios. La variación de la posición del polo posterior es mínima, alrededor de 0,01 mm.

- Variaciones del diámetro

El diámetro frontal (ecuatorial) del cristalino disminuye durante la acomodación en un valor de 0,4 a 0,5 mm.

- Variaciones de índice de refracción del cristalino

Aumenta el índice total debido a un desplazamiento de las fibras lenticulares. A este mecanismo Gullstrand lo denominó *mecanismo intra-capsular de la acomodación*.

- Modificaciones en el dentado del ecuador

Las ondulaciones del borde del cristalino se pierden durante la visión próxima y reaparecen en visión lejana.

- Tremulación del cristalino acomodado

Se atribuye a la relajación de las zónulas y al ligero desplazamiento del cristalino por acción de la gravedad y a la pequeña rotación alrededor de un eje vertical.

d) Modificaciones en el músculo ciliar, en la zónula, y en los procesos ciliares:

El músculo ciliar actúa sobre el cristalino por medio de las fibras de la zónula. La contracción del músculo ciliar produce un desplazamiento de los procesos ciliares, que se aproximan al eje antero-posterior del ojo, pero sin llegar a ponerse en contacto con el cristalino, y como consecuencia las fibras de la zónula se relajan.

La capacidad de contracción del músculo ciliar está poco afectada por la edad, por lo que la presbicia no es debida a una pérdida de la potencia del músculo sino a procesos que tienen lugar en el cristalino.

La forma de músculo ciliar depende del desarrollo del músculo de Müller-Rouget. Este músculo está poco desarrollado en el miope, en el que aparece adelgazado, y por el contrario se abulta mucho en el hipermetrope. En el miope, a causa de ser menor la necesidad de acomodar, el músculo ciliar se atrofia, mientras que en el hipermetrope, debido al hecho de ser necesaria la acomodación incluso en visión lejana, el músculo sufre una hipertrofia.

6.3 RECORRIDO Y AMPLITUD DE LA ACOMODACIÓN.

El *punto remoto* (M_r) es aquel punto conjugado con el centro de la mácula (M') por refracción en el ojo cuando la acomodación está totalmente relajada, en cuyo caso un objeto situado en el punto remoto puede formar su imagen en la retina. Cuando actúa la acomodación máxima, el punto más cercano que puede verse nítidamente se llama *punto próximo* (M_p). Este punto objeto es

conjugado con el centro de la mácula (M') cuando la potencia del ojo está al máximo, es decir completamente acomodado. Se considera que estas definiciones, que se refieren a la refracción en el ojo solamente, corresponden a los *puntos remoto y próximo verdaderos*.

Por lo tanto, se puede definir la acomodación como la propiedad que posee el cristalino de modificar su potencia de manera que la imagen retiniana permanezca nítida cuando el objeto se desplaza entre el punto remoto y el punto próximo; en el aparato fotográfico esta puesta a punto se obtiene por la variación de la longitud axial (desplazando el objetivo) mientras que en el ojo hay una modificación de la potencia.

La distancia lineal desde la superficie reducida del ojo hasta el punto próximo de acomodación HM_p se designa por p y su distancia dióptrica $1/p$ por P . El máximo esfuerzo de acomodación se denomina *amplitud de acomodación* (A_m) y es la diferencia entre el máximo poder de refracción del ojo para enfocar M_p y la mínima potencia del ojo utilizada para tener visión nítida en M_r .

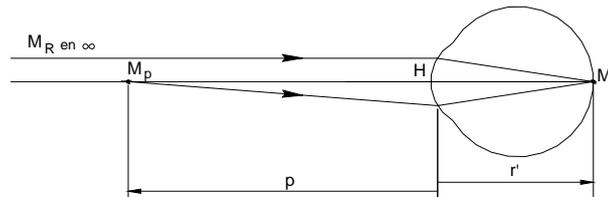


Figura 6.4. El punto remoto M_r y el punto próximo de acomodación M_p de un ojo emétrope.

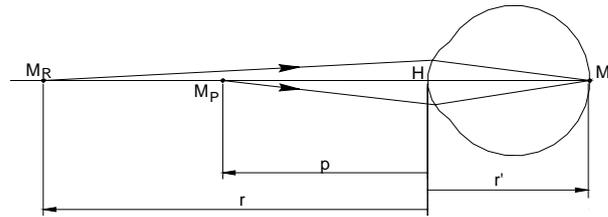


Figura 6.5. El punto remoto M_r y el punto próximo de acomodación M_p de un ojo miope.

La *Figura 6.4* muestra los puntos remoto y próximo de un ojo emétrepe y la *Figura 6.5* aquellos de un ojo miope. En el caso general se tienen las siguientes relaciones:

Para el ojo relajado

$$R' = R + F_o$$

Para el ojo completamente acomodado

$$R' = P + (F_o + Am)$$

por lo tanto, la amplitud de acomodación es

$$Am = R - P$$

La acomodación necesaria para enfocar un punto próximo S cualquiera se llama *acomodación ocular* (A). Viene dada por la diferencia entre las vergencias incidentes en el ojo cuando se observa primero un objeto lejano, tal que el ojo está desacomodado, y después cuando se observa un objeto próximo S con el ojo acomodado.

$$A = R - S$$

Puesto que la amplitud de acomodación (A_m) es la máxima cantidad de acomodación, cualquier cantidad inferior de acomodación (A) involucrada en alguna tarea visual se sitúa en el rango $0 \leq A \leq A_m$

Se dice que el ojo está “relajado” cuando no hay acomodación en juego.

Calcular la acomodación ocular necesaria para enfocar un objeto a $1/3$ m del ojo sin compensar en el caso de

a) un miope con $R = -3$ D, b) un emétrope, y c) un hipermetrope con $R = +3$ D.

En todos los casos $S = 1 / s = -3$ D

a) En el miope: $A = R - S = (-3) - (-3) = 0$ D

b) En el emétrope: $A = R - S = 0 - (-3) = +3$ D

c) En el hipermetrope: $A = R - S = (+3) - (-3) = +6$ D

La distancia lineal desde el punto remoto hasta el punto próximo, es decir, aquella sobre la que es eficaz la acomodación, se llama *recorrido de acomodación*. De este modo, para un emétrope con 8 D de acomodación, la distancia del punto próximo es $1/8$ metros o 125 mm, así el recorrido de acomodación va desde el infinito hasta 125 mm.

En el *miope*, el punto remoto está a una distancia finita enfrente del ojo y por lo tanto acomoda menos que el emétrope. Suponiendo que, sólo puede ver claramente los objetos situados a 20 cm de distancia y que su punto próximo está a 10 cm del ojo, su recorrido de acomodación irá desde 20 cm delante del ojo hasta 10 cm delante del ojo, y su amplitud de acomodación será

$$R = 1/-0.2 = -5 \text{ D}; \quad P = 1/-0.1 = -10 \text{ D}$$

$$A_m = -5 - (-10) = 5 \text{ D.}$$

Un miope, aunque no pueda ver claramente los objetos lejanos mediante un esfuerzo de acomodación, tiene la ventaja de ver de cerca con mucho

menos esfuerzo que el emétrope o el hipermétrope porque en ese sentido está parcialmente acomodado en su estado normal.

Ejemplo

¿Cuál es el recorrido de acomodación de un miope sin compensar de -4 D cuya amplitud es 10 D?

$$r = 1 / R = 1 / -4 = -0,25 \text{ m} = -250 \text{ mm}$$

$$P = R - Am = -4 - 10 = -14 \text{ D}$$

$$p = -71,4 \text{ mm}$$

El recorrido de acomodación es -250 hasta -71,4 mm.

El *hipermétrope* tiene su punto remoto situado detrás del ojo, y por lo tanto necesita hacer un esfuerzo acomodativo constante, pues precisa de la acomodación aún para mirar los objetos lejanos. Para ver claramente de lejos tiene que emplear una acomodación equivalente a su hipermetropía.

¿Cuál es la acomodación ocular que necesita un hipermétrope sin compensar con una refracción ocular de +3,00 D para enfocar un objeto lejano?

Para un objeto lejano la vergencia incidente en el ojo sin lente será cero. Por lo tanto,

$$A = R - S = (+3,00) - 0 = +3,00 \text{ D.}$$

El hipermétrope sin compensar tiene que acomodar la misma cantidad que su refracción ocular para obtener una imagen retiniana nítida de un objeto lejano. Esto requiere un esfuerzo muscular que puede conducir a síntomas como cansancio ocular o dolores de cabeza. La mayor demanda de acomodación del hipermétrope, también puede producir consecuencias más serias como el estrabismo en algunos niños.

Ejemplo:

¿Cuál es el recorrido de acomodación de un hipermetrope no compensado de +4 D cuya amplitud de acomodación es de 6 D?

$$r = 1/R \qquad r = 1/4 = 0,25 \text{ m} = 25 \text{ cm}$$

$$A = R - P \qquad P = R - Am = 4 - 6 = -2 \text{ D}$$

$$p = 1/-2 = -50 \text{ cm}$$

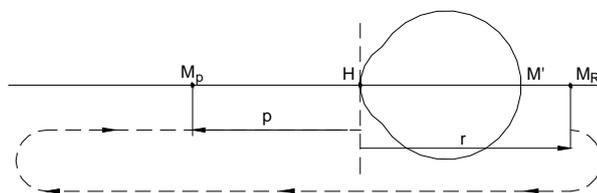


Figura 6.6. Recorrido de acomodación en el ojo hipermetrope.

El recorrido de acomodación se puede considerar dividido en dos partes (Figura 6.6). Si se ejercen hasta 4 D de la acomodación disponible, la hipermetropía se puede reducir progresivamente hasta cero; de esta forma, el punto conjugado de la retina retrocede desde el punto remoto hasta el infinito. Esta es la parte virtual del recorrido de acomodación. Las 2 D de acomodación restantes se pueden emplear para ver claramente desde el infinito hasta - 50 cm delante del ojo. Esta es la parte real del recorrido total de acomodación, algunas veces llamado recorrido de visión nítida.

En los ojos emetrópicos y miópicos, el *punto próximo* siempre es un punto objeto real (p negativo) situado enfrente del ojo, pero en el ojo hipermetrope puede ser tanto un punto objeto real situado delante del ojo como un punto

objeto virtual situado detrás del ojo; solamente será real si su amplitud de acomodación es mayor que su ametropía ($P = R - Am$).

Mientras que el punto remoto está bien definido, el punto próximo no lo está, pues la acomodación es un esfuerzo variable y por tanto depende de factores como la fatiga y en particular de la convergencia binocular de los ejes de los dos ojos. Además, la posición del M_p no es fija para cualquier posición de mirada, sino que varía con esta. El ojo acomoda mejor cuando mira hacia abajo y adentro, y peor hacia arriba y hacia fuera.

6.3.1 Influencia de la refracción ocular en la acomodación

La amplitud de acomodación varía con la refracción ocular ya que $Am = R - P$.

En el ojo *miope* la acomodación a todas las distancias es menor que en el emétrope, el punto próximo está mas cerca y el recorrido de acomodación es menor. En los siguientes ejemplos se muestran estas diferencias entre el ojo miope y el emétrope.

1. - Menor necesidad de acomodación:

Un miope cuyo M_r está a 33 cm, es decir, un miope de 3 D ve a esta distancia sin acomodar.

Si lee a 25 cm, $S = -\left(\frac{1}{-0,25}\right) = -4$ D, su acomodación será

$$A = -3 - (-4) = 1D$$

Mientras que la acomodación del emétrope para esa misma distancia de lectura será

$$A = 0 - (-4) = 4D$$

Sin embargo, si el miope está compensado emplea el mismo número de dioptrías de acomodación que el emétrope.

2. - Punto próximo más cerca:

Suponiendo dos sujetos de 20 años con $A_m = 10$ D, uno emétrope y el otro miope de 5 D.

En el caso del emétrope el M_p estará situado a:

$$P = R - A_m = 0 - 10 = -10 \text{ D}$$

$$p = 1/-10 = -0,1\text{m}; \text{ es decir a } 10 \text{ cm delante del ojo.}$$

En el miope el M_p estará situado a:

$$P = R - A_m = -5 - 10 = -15 \text{ D}$$

$$p = 1/-15 = -0,066 \text{ m es decir a } 6,6 \text{ cm delante del ojo.}$$

3. - Menor recorrido de acomodación:

Un emétrope y un miope de 2 D, ambos con $A_m = 8$ D.

Emétrope:

$$A_m = R - P; \quad P = R - A_m = 0 - 8 = -8 \text{ D}; \quad p = -1/8 = -0,12 \text{ m}$$

El recorrido de acomodación va desde el infinito hasta 12 cm delante del ojo.

$$\text{Miope de } 2 \text{ D: } r = 1/-2 = -0,5 \text{ m}$$

$$P = R - A_m = -2 - 8 = -10 \text{ D}; \quad p = 1/-10 = -0,1 \text{ m}$$

El recorrido de la acomodación va desde 50 cm por delante del ojo hasta 10 cm por delante del ojo es decir 40 cm.

En el ojo *hipermétrope* la amplitud de acomodación es mayor que en el emétrope y el punto próximo está más lejos.

Ejemplo,

Un hipermétrope de 2 D para ver un objeto situado a 10 cm emplea 2 D más de acomodación que el emétrope, que son las que necesita para que su punto remoto retroceda hasta el infinito. Por consiguiente, aunque su recorrido de acomodación es infinito, la amplitud de acomodación es necesariamente mayor.

$$R = 2 \text{ D} \qquad r = 1/2 = 0,5 \text{ m}$$

El recorrido de acomodación se extiende desde 50 cm detrás del ojo hasta 10 cm delante del ojo, y por lo tanto es igual a infinito.

La amplitud de acomodación es:

$$R = 2 \text{ D} \quad \text{y} \quad P = 1/-0.10 = -10 \text{ D} \quad A = 2 - (-10) = 12 \text{ D.}$$

Sin embargo, en el emétrope la amplitud de acomodación es de 10 D.

El ojo *astigmata* tendrá tendencia a acomodar sobre el círculo de mínima confusión o sobre su focal vertical, ya que ésta da una imagen neta de líneas verticales que son las más importantes en los caracteres de imprenta a los que estamos habituados. En el astigmatismo nunca se obtiene una imagen nítida ya que la acomodación no actúa de forma desigual para contrarrestar un error astigmático.

6.3.2 Recorrido de acomodación con lentes oftálmicas

Si hay algún sistema óptico delante del ojo, los puntos conjugados con el centro de la mácula en el ojo relajado y completamente acomodado se conocen

como *punto remoto aparente* y *punto próximo aparente* respectivamente. Estos están representados en la *Figura 6.7* en el caso de un ojo miope compensado con una lente oftálmica más débil que la compensación lejana. Esto es típico de una compensación con lentes oftálmicas para visión próxima en sujetos de mediana edad o ancianos. En cada diagrama los puntos verdadero y aparente son conjugados entre sí por refracción en la lente.

El recorrido de acomodación mostrado en la *Figura 6.7* es de una importancia práctica considerable. Si la lente es para visión cercana el sujeto necesitará algo de recorrido de acomodación para la mayoría de las tareas en visión próxima. Esto es especialmente importante en trabajos donde los objetos están distribuidos a diferentes distancias sobre la mesa o superficie de trabajo.

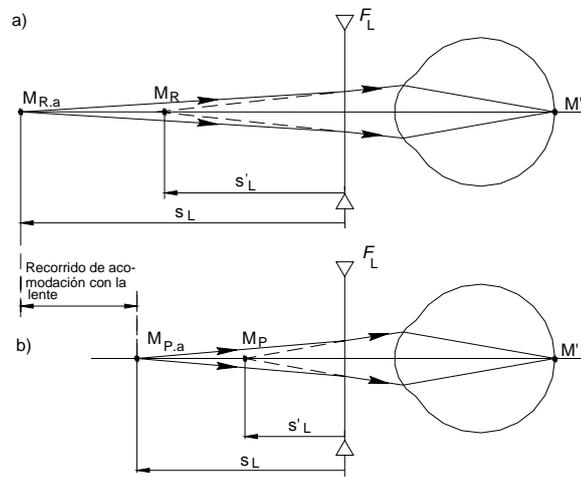


Figura 6.7. Un ojo compensado con una lente más débil que la compensación lejana. Esto es típico de una lente de lectura para una persona de mediana edad con miopía. a) Puntos remotos aparente y verdadero en el ojo desacomodado. b) Puntos próximos aparente y verdadero en el ojo completamente acomodado.

Las definiciones de los puntos remoto y próximo aparente son las siguientes:

El *punto remoto aparente* ($M_{r,a}$) es aquel punto conjugado con el centro de la mácula (M') por refracción en el ojo desacomodado y en algún sistema óptico delante de él.

Cuando el ojo está compensado con su lente oftálmica lejana el punto remoto aparente está en el infinito.

El *punto próximo aparente* ($M_{p,a}$) es aquel punto conjugado con el centro de la mácula por refracción en el ojo completamente acomodado y en algún sistema óptico delante de él.

Ejemplo

Un ojo miópico con una refracción ocular de $-4,72$ D el punto objeto más próximo que puede enfocar está situado a 20 cm delante de la lente compensadora lejana que lleva a 12 mm. Calcular las posiciones de los puntos remoto y próximo verdaderos y aparentes, el recorrido de acomodación con y sin la lente, y la amplitud de acomodación ocular.

El punto próximo aparente, cuando el ojo está completamente acomodado, está 20 cm delante de la lente.

El punto remoto aparente está en el infinito, y esto siempre es cierto cuando se lleva la compensación lejana, ya que éste es el propósito de toda compensación. (*Figura 6.8 a*).

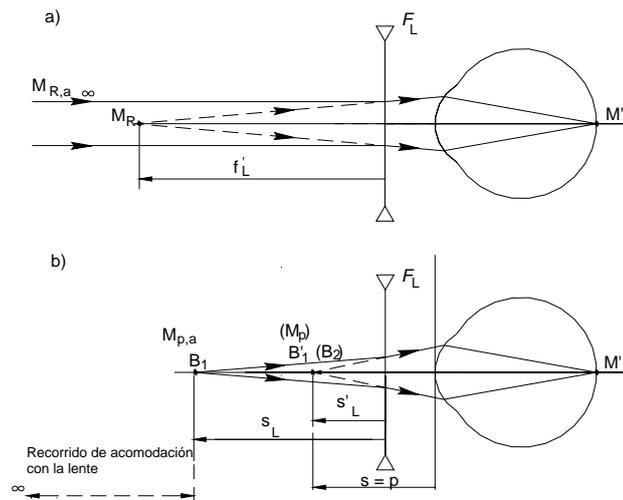


Figura 6.8. Diagrama correspondiente al ejemplo a) Posiciones de los puntos remotos verdadero y aparente. b) Posiciones de los puntos próximos verdadero y aparente.

La distancia del punto remoto verdadero, medido desde el ojo es

$$r = 1/R = 1 / (-4,72) = -0,212 \text{ m.}$$

En la *Figura 6.8* (b) cuando el ojo está completamente acomodado la luz proviene del punto B'_1 , la imagen de B_1 a través la lente oftálmica, y actúa como punto objeto B_2 para el ojo. B_2 está a una distancia s desde el ojo. Debido a que el ojo está totalmente acomodado s es igual a p , la distancia del punto próximo verdadero desde el ojo. Por lo tanto, B_2 es la posición del punto próximo verdadero M_p . Para calcular s o p es necesario conocer la potencia de la lente F_L . Por lo tanto,

$$f' = r + d = -212 + 12 = -200 \text{ mm}$$

$$F_L = -5,00 \text{ D}$$

Por refracción en la lente oftálmica

$$S'_L = S_L + F_L = 1/s_L + F_L = 1/-0,20 + -5,00 = -10 \text{ D}$$

$$s'_L = -100 \text{ mm}$$

La distancia del punto próximo verdadero es

$$p = s'_L - d = -100 - 12 = -112 \text{ mm}$$

$$P = -8,93 \text{ D}$$

La amplitud de acomodación es

$$Am = R - P = (-4,72) - (-8,93) = +4,21 \text{ D.}$$

El recorrido de acomodación sin la lente compensadora lejana va desde el punto remoto verdadero hasta el punto próximo verdadero; esto es, desde 21,2 cm delante del ojo hasta 11,2 cm.

Con la lente oftálmica lejana, el recorrido de acomodación está entre los puntos remoto y próximo aparentes, que va desde el infinito hasta 20 cm delante del ojo.

Posiciones relativas de los puntos próximos aparente y verdadero:

En el miope compensado para visión lejana el punto próximo aparente siempre está más lejos que su punto próximo verdadero determinado sin lente oftálmica. Por lo tanto, el tamaño de la imagen retiniana para un objeto situado en el punto próximo es mucho mayor sin las gafas. Esto explica porque el miope se quita las gafas para ver detalles muy pequeños.

En el ojo hipermetrope el punto próximo aparente está más cerca que el punto próximo verdadero que incluso puede ser un punto virtual detrás del ojo, y en cuyo caso no hay una posición objeto real donde se pueda obtener

una imagen retiniana clara sin lentes oftálmicas, por ello el hipermetrope prefiere ponerse las gafas para ver los detalles pequeños de un objeto cercano.

6.4 ACOMODACIÓN OFTÁLMICA Y ACOMODACIÓN OCULAR

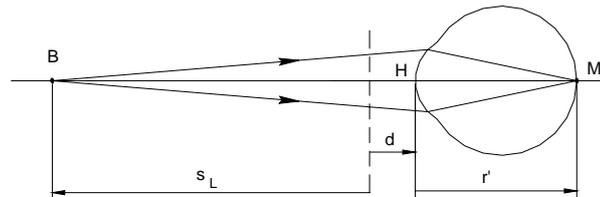


Figura 6.9. Distancia s_L de un objeto próximo B medida desde el plano de la lente oftálmica.

Si un sujeto lleva la compensación lejana pero observa un objeto próximo, para ver claramente necesita acomodar. Cuando observa un punto lejano la vergencia que alcanza a la lente oftálmica es cero pero cuando observa un punto objeto próximo, sobre la lente inciden rayos divergentes (*Figura 6.9*). Un rayo que parta de este punto próximo tendrá una vergencia S_L ($= 1/s_L$) en la lente oftálmica y para obtener una imagen retiniana nítida esta vergencia negativa se debe neutralizar eficazmente. Como S_L es negativa, el ojo debe incrementar su potencia, efectiva en la lente oftálmica, en $-S_L$. Esto se llama *acomodación oftálmica*, que se indica como A_L . Por lo tanto, para un objeto próximo delante de la lente compensadora lejana,

$$A_L = -S_L$$

donde S_L es la vergencia en la lente compensadora lejana, cuando se observa un objeto próximo a una distancia s_L de la lente. La acomodación oftálmica es por lo tanto la cantidad de potencia positiva puesta en juego por el

ojo cuando acomoda, pero efectiva en la lente oftálmica. Por simplicidad se asume que la lente es delgada.

La acomodación oftálmica es la medida de acomodación más común en la práctica clínica. Ésta es la diferencia dióptrica entre las vergencias incidentes en la lente oftálmica con el ojo desacomodado y totalmente acomodado. Si el sujeto lleva la compensación lejana, el punto remoto aparente estará en el infinito tal que la vergencia incidente será cero y por lo tanto la acomodación oftálmica A_L será la inversa de la distancia del punto próximo aparente desde el plano de la gafa.

Debido a la separación lente-ojo, la *acomodación ocular* (A) difiere en general de la acomodación oftálmica (A_L), frecuentemente en una cantidad significativa. Si d es la distancia de vértice, esto es, la distancia positiva desde el centro de la lente hasta el punto principal del ojo, entonces, en el caso más simple del ojo emétrope,

$$\text{si } s_L = -250 \text{ mm y } d = 14 \text{ mm}$$

la distancia objeto medida desde el ojo será $H_B = -264 \text{ mm}$,

que nos dará una acomodación ocular de

$$A = 1/0,264 = 3,79 \text{ D}$$

Y una acomodación oftálmica de,

$$A_L = 1/0,250 = 4,00 \text{ D}$$

Por lo tanto, para el emétrope, la acomodación ocular es menor que la acomodación oftálmica.

Cuando se lleva la compensación lejana, la relación se complica por el hecho de que el efecto producido por la separación lente-ojo varía con la vergencia del fascículo luminoso emergente de la lente. En visión lejana, la vergencia en el punto principal del ojo es igual a la refracción ocular o ametropía R . En visión próxima, los rayos procedentes de un punto próximo

dado alcanzan el ojo con una vergencia S que es numéricamente menos positiva o más negativa que R . Para tener una imagen retiniana nítida, la potencia del ojo debe incrementarse en $(R - S)$. Por lo tanto la acomodación ocular necesaria para enfocar el objeto próximo es:

$$A = R - S$$

Debe quedar claro que $R - S$ es la diferencia entre las vergencias incidentes sobre el ojo cuando se observa primero un objeto lejano mientras se lleva la lente compensadora de lejos, tal que el ojo está desacomodado, y después cuando se observa un objeto próximo con el ojo acomodado. Esta *acomodación ocular* se refiere al cambio de potencia en la superficie reducida del ojo.

La *Figura 6.10* representa el caso de un ojo miope compensado en visión lejana con una lente delgada de potencia F_L .

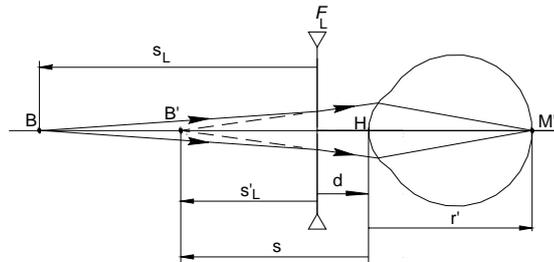


Figura 6.10. Un ojo miope compensado con una lente oftálmica de potencia F_L observando un objeto próximo B.

La acomodación ocular necesaria para observar un punto cercano se puede calcular como en el siguiente ejemplo:

Un ojo miópico se compensa con una lente delgada de $-4,00$ D a una distancia de vértice de 14 mm. Comparar la acomodación ocular con la acomodación oftálmica cuando se observa un objeto a 350 mm del punto principal del ojo y calcular la acomodación requerida por un emétrope para enfocar el mismo objeto.

La distancia objeto hasta la lente oftálmica es

$$s_L = -350 + 14 = -336 \text{ mm}$$

La acomodación oftálmica $A_L = 1000/336 = 2,98 \text{ D}$

La refracción ocular R es,

$$F_L = -4,00 \text{ D} \quad f_L = -250 \text{ mm}$$

$$r = f_L - d = -250 - 14 = -264 \text{ mm} \quad R = -3,79 \text{ D}$$

La vergencia S en el ojo es,

$$s_L = -336 \text{ mm} \quad S_L = -2,98 \text{ D}$$

$$S'_L = S_L + F_L = -2,98 + (-4,00) = -6,98 \text{ D} \quad s'_L = -143,27 \text{ mm}$$

$$s = s'_L - d = -143,27 - 14 = -157,27 \text{ mm} \quad S = -6,36 \text{ D}$$

Por lo tanto la acomodación ocular es,

$$A = R - S$$

$$A = -3,79 - (-6,36) = 2,57 \text{ D}$$

Como el punto próximo de mirada está a -350 mm del ojo, la acomodación que necesita el emétrope es $1000 / 350 = 2,86 \text{ D}$

El miope compensado con lentes oftálmicas usa menos acomodación que el emétrope. La razón de acomodación ocular del amétrope respecto de la acomodación que necesita un emétrope se ha denominado “unidad acomodativa”. En este caso es $2,57 / 2,86$ o $0,90$.

Respecto a la acomodación, el amétrope compensado con lentes de contacto se puede considerar como un emétrope. Es decir, los usuarios de lentes de contacto requieren aproximadamente la misma cantidad de acomodación que la que necesitaría ejercer un emétrope.

Por lo tanto, un miope que pasa de llevar lentes oftálmicas a lentes de contacto necesita ejercer más acomodación en visión próxima. Estos efectos son mayores con lentes de potencia elevada y pueden ser clínicamente significativos cuando una persona de mediana edad cambia de lentes oftálmicas a lentes de contacto, ya que si su capacidad de acomodar se ha reducido hasta tal extremo que el trabajo próximo con lentes de contacto es difícil, necesitará algún tipo de compensación adicional para la lectura.

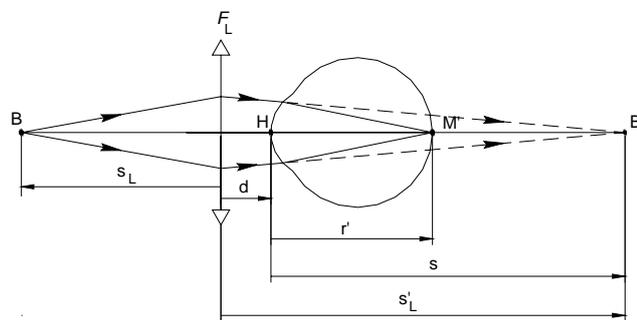


Figura 6.11. Un ojo hipermetrope compensado con una lente oftálmica de potencia F_L observando un objeto próximo B.

Ejemplo en el caso del hipermetrope:

Un ojo hipermetrope es compensado con una lente delgada de $+4,00$ D a una distancia de vértice de 14 mm. Un punto próximo de mirada está a -350 mm del punto principal del ojo. Comparar la acomodación ocular con la acomodación oftálmica y aquella requerida por un emétrope para enfocar el mismo objeto.

La acomodación en la lente y la acomodación necesaria en el emétrope es la misma que en ejemplo anterior. La *Figura 6.11* ilustra los cálculos de acomodación ocular en el hipermetrope.

La refracción ocular es,

$$F_L = +4,00 \text{ D} \quad f_L = +250 \text{ mm}$$

$$r = f_L - d = 250 - 14 = 236 \text{ mm} \quad R = +4,24 \text{ D}$$

La vergencia S en el ojo es

$$s_L = -336 \text{ mm} \quad S_L = -2,98 \text{ D}$$

$$S'_L = S_L + F_L = -2,98 + 4,00 = 1,02 \text{ D} \quad s'_L = +980,4 \text{ mm}$$

$$s = s'_L - d = 980,4 - 14 = +966,4 \text{ mm} \quad S = +1,03 \text{ D}$$

Por lo tanto la acomodación ocular es

$$A = R - S = 4,24 - 1,03 = +3,21 \text{ D}$$

En este caso, la unidad acomodativa es $3,21/2,86$ o $1,12$.

El hipermetrope compensado con lentes oftálmicas usa más acomodación que el emétrope. En este caso un hipermetrope que lleve lentes de contacto se beneficiará substancialmente de la menor demanda de un esfuerzo acomodativo.

Se puede deducir una expresión aproximada para calcular la acomodación ocular ($R - S$). Dado un objeto a una distancia s_L de una lente delgada de potencia F_L , situada a una distancia de vértice d del ojo, la vergencia objeto, efectiva en el ojo, se obtiene de

$$S = \frac{S_L + F_L}{1 - d(S_L - F_L)}$$

mientras que la refracción ocular es $R = \frac{F_L}{1 - d \cdot F_L}$

Por lo tanto, la acomodación ocular es

$$A = \frac{-S_L}{(1 - dF_L) \cdot [1 - d \cdot (S_L + F_L)]}$$

Si esta expresión se expande mediante el teorema binomial y se omiten los términos elevados al cuadrado y las potencias elevadas, se obtiene que

$$A = -S_L \cdot [1 + d \cdot (S_L + 2F_L)]$$

6.5 TAMAÑO DE LA IMAGEN RETINIANA NÍTIDA DE UN OBJETO PRÓXIMO EN LAS AMETROPÍAS COMPENSADAS

Ejemplo:

Un ojo reducido hipermetrope axial se compensa con una lente delgada de +7,00 D a 10 mm, y observa un objeto de 20 mm a 25 cm de distancia de la lente. ¿Cuál será el tamaño de la imagen retiniana nítida y cuál la acomodación ocular?

Para obtener una imagen retiniana nítida, la vergencia imagen en la superficie reducida del ojo siempre debe ser R' , que se puede calcular conociendo el valor de la refracción ocular y la potencia del ojo ($F_O = +60$ D).

$$R = \frac{F_L}{1 - d \cdot F_L} = \frac{+7}{1 - 0,010 \times 7} = +7,527 D.$$

$$R' = R + F_o = 7,527 + 60 = +67,527 D.$$

La lente compensadora forma una imagen, independientemente del ojo, que luego actuará como objeto para el ojo. La vergencia (S) con la que llegan los rayos al ojo, procedentes de la imagen que forma la lente oftálmica del objeto situado a 25 cm se calcula como sigue,

$$S_L = \frac{1}{s_L} = \frac{1}{-0,25} = -4,00 D.$$

La refracción en la lente oftálmica da:

$$S'_L = S_L + F_L = -4 + 7 = +3,00 D. \quad s'_L = +333,33 \text{ mm}$$

$$s = s'_L - d = 333,33 - 10 = 323,33 \text{ mm} \quad S = 3,093 D.$$

El tamaño de la imagen retiniana nítida es igual a:

$$y'_c = y' \times \frac{S}{R'} \quad y'_c = y \times \frac{S_L}{S'_L} \times \frac{S}{R'}$$

$$y'_c = 20 \times \frac{-4}{+3} \times \frac{+3,093}{+67,527} = -1,22 \text{ mm}$$

Y la acomodación ocular que utiliza es:

$$A = R - S = 7,527 - 3,093 = +4,434 D.$$

En el ojo reducido debidamente acomodado, el tamaño de la imagen retiniana nítida de un objeto próximo tiene el mismo tamaño (básico) que la imagen retiniana borrosa en el supuesto de que el ojo no hiciese un cambio acomodativo en su potencia.

6.6 ESTÍMULOS Y COMPONENTES FUNCIONALES DE LA ACOMODACIÓN

Al mirar un objeto cercano el estímulo para acomodar se produce por la conjunción de varios factores; entre ellos están:

a) La borrosidad de la imagen retiniana, cuando se pasa de mirar de lejos a cerca. Es decir, el aumento de los círculos de difusión de la imagen.

b) El cambio de la vergencia de los rayos de luz que llegan a la retina; es decir, la variación de la inclinación de los rayos de luz debido al movimiento del objeto fijado hacia una posición más próxima.

Si delante de un ojo emétrope joven se pone una lente convergente positiva para visión lejana, se produce una imagen retiniana borrosa que no conlleva reflejo acomodativo. En cambio si se coloca una lente divergente débil, la visión de los objetos lejanos será nítida (el reflejo acomodativo lleva la imagen sobre la retina) y si se retira la lente, se obtiene una visión igualmente clara al cabo de una fracción de segundo.

Se deduce que la lente negativa hace que los rayos luminosos procedentes del objeto sean divergentes para el ojo en lugar de paralelos, esto estimula la acomodación y la imagen se enfoca sobre la retina.

Según las experiencias de Fincham, cuando los rayos que parten del objeto llegan divergentes al ojo, entra en acción la acomodación, pero cuando la luz es paralela la acomodación permanece invariable. Se sabe que los hipermétropes débiles están en constante acomodación para compensar su defecto de refracción, pero si se les compensa con una lente positiva, la acomodación se relaja automáticamente. Por lo tanto, existe un mecanismo visual sensible a la inclinación de la luz que incide en la retina.

c) Estímulos psíquicos tales como el tamaño aparente y la distancia aparente, es decir, la conciencia de proximidad.

d) La aberración cromática.

Fincham ha encontrado que el 60 % de los sujetos no tienen reflejo de acomodación con luz monocromática.

La imagen retiniana con luz blanca tiene aberración cromática (bordes coloreados que cambian a medida que el foco se modifica, son rojos en el caso de la hipermetropía y azules en el caso de miopía). Se puede suponer que la retina que es sensible al color detecta estas diferencias cromáticas, es decir, los cambios de los bordes coloreados de la imagen producidos por la aberración cromática, que se interpretan produciéndose el reflejo de acomodación.

Este reflejo de acomodación es un reflejo adquirido que se aprende, y no un reflejo innato como el reflejo pupilo motor. Además, es un reflejo con punto de partida macular. Como en visión escotópica la fijación es paramacular, la amplitud de acomodación decrece cuando disminuye la luminancia de fondo.

En ausencia de estímulo, para obtener una imagen retiniana clara se desarrolla cierta cantidad de acomodación en ojos no presbítas. Esto ocurre en la *oscuridad* haciéndose el ojo miope de 0,5 D a 1 D y en el *espacio vacío* que se encuentra al volar a grandes alturas. La miopía nocturna se produce por el cambio en la curvatura del cristalino debido a la acomodación, pero también por el aumento de la aberración esférica en la oscuridad.

Por otra parte, la acomodación no es un reajuste instantáneo, sino que para pasar de la visión lejana a la visión próxima o viceversa, se requiere cierto tiempo. Así, para pasar de visión lejana a visión cercana hacen falta aproximadamente 0,5 segundos, mientras que el tiempo para el proceso contrario es menor. Esta *velocidad de acomodación* disminuye a medida que se aproxima la edad de la presbicia y en el trastorno conocido como inercia de la acomodación, donde la acomodación se realiza en un tiempo superior al normal.

Una vez el enfoque del objeto fijado se ha efectuado, el equilibrio de los músculos que se encarga de mantenerlo está sometido a pequeñas variaciones.

De aquí resultan deformaciones del cristalino que a la vez deforman la imagen y la hacen oscilar a una y otra parte de su posición media. Este fenómeno ha sido llamado por Arnulf *microfluctuaciones de la acomodación*. El valor medio de estas variaciones es de 0,075 dioptrías.

6.6.1 Fenómenos asociados con la acomodación

Existen dos fenómenos relacionados con la acomodación que, aunque no la acompañan necesariamente en todos los casos o en la misma cuantía, por lo general actúan en concordancia con ella. Esta acción asociada se ha denominado *sincinesia* (del griego: con movimiento). Por tanto, es necesario que varios fenómenos entren en juego simultáneamente para que la visión próxima sea nítida:

La acomodación, que permite enfocar la imagen sobre la retina, gracias a la contracción del músculo ciliar.

La convergencia, que permite girar los ojos hacia adentro, mediante los rectos internos, para que sus ejes visuales se dirijan hacia el objeto próximo. Cuanto más cerca está el objeto, mayor será la convergencia y, al mismo tiempo, mayor la acomodación.

La miosis, que se produce por la contracción del esfínter pupilar, tiene varias funciones: reduce las aberraciones ópticas debidas a los cambios de curvatura del cristalino durante la acomodación al eliminar las zonas periféricas de éste; pero sobre todo, suprime el aumento relativo de luz que entra en el ojo desde los objetos próximos. También aumenta la profundidad de foco y reduce los círculos de difusión.

Estos tres fenómenos están ligados fisiológicamente entre sí ya que dependen de la misma inervación: el tercer par craneal; pero son independientes, aunque cuando se enfoca un objeto próximo se solicitan simultáneamente por un mismo impulso central.

6.6.2 Acomodación física y fisiológica

Es evidente que en la eficacia del acto de la acomodación intervienen la capacidad del cristalino para variar su forma y la potencia del músculo ciliar que es capaz de producir dicha deformación. Si la sustancia del cristalino se vuelve inelástica, como ocurre al envejecer, y ya no puede cambiar de forma, la acomodación no puede efectuarse aunque el músculo ciliar se contraiga energicamente. Por otro lado, un músculo ciliar débil o paralizado no podrá inducir variaciones ni siquiera en un cristalino de elasticidad normal. Así pues, en el mecanismo de la acomodación se han establecido dos consideraciones distintas que Fuschs ha diferenciado como *acomodación física* y *acomodación fisiológica*.

La acomodación física expresa la deformación física real del cristalino y se mide en dioptrías. La acomodación fisiológica se refiere a los factores dependientes del músculo ciliar y tiene como unidad la *mioptría*, que se toma como el poder contráctil del músculo ciliar necesario para aumentar el poder de refracción del cristalino en 1 D.

Estos dos elementos son, en esencia, distintos y, aunque normalmente son concordantes durante la primera mitad de la vida, pueden dissociarse y, cuando lo hacen, acarrear diversos efectos patológicos. La acomodación física disminuye con la edad cuando el cristalino se endurece en la presbicia. En cambio la potencia ciliar disponible persiste en el anciano. A la inversa, en los estados de debilidad a cualquier edad puede aparecer un fracaso en la potencia fisiológica del músculo que disminuye o suprime la acomodación aunque el cristalino sea deformable.

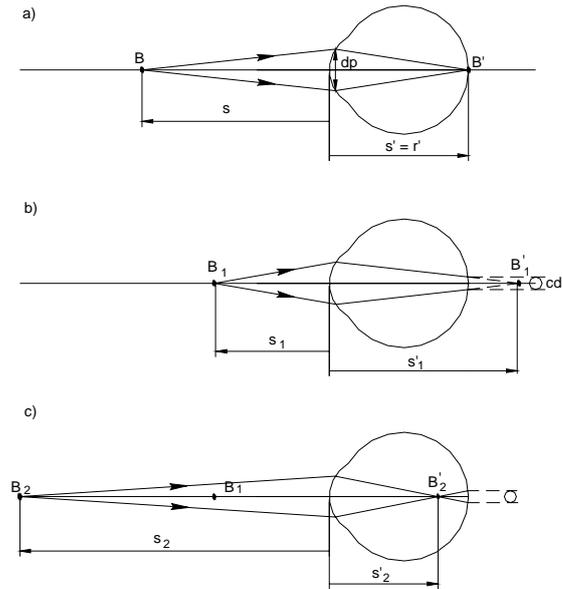
6.7 PROFUNDIDAD DE FOCO Y PROFUNDIDAD DE CAMPO

El ojo emétrope es capaz de ver nítidamente sin necesidad de acomodar los objetos situados entre el infinito y 6 m. A distancias menores de 6 m, para ver con nitidez los objetos, ha de poner en juego el mecanismo de la acomodación. Los objetos lejanos se pueden ver de forma nítida debido a que la retina posee un determinado espesor y el objeto puede sufrir desplazamientos de cierta intensidad, sin que la imagen experimente un

desenfoque apreciable. Esta capacidad de poder ver con nitidez al mismo tiempo dos objetos situados a distinta distancia sin ningún cambio en la acomodación ni en la apertura pupilar se llama profundidad de foco; objetos más cercanos y más lejanos se verán borrosos. Por lo tanto, *profundidad de foco* es la distancia en la retina sobre la cual una imagen óptica puede moverse sin alteración de la claridad. El intervalo de profundidad de foco oscila entre +0,04 D hasta +0,47 D.

La profundidad de la zona de visión nítida en el campo visual, en la cual un objeto aparece enfocado, se conoce como *profundidad de campo*, y su existencia reduce la necesidad de una acomodación exacta; de hecho, el mecanismo de la acomodación habitualmente sólo es ejercido durante un mínimo necesario para una visión clara. Además los conos responden tanto a un punto de luz, como a un círculo de luz que llene su apertura. Esta amplitud de respuesta, permite que la imagen en la retina sea un poco subenfocada o sobre-enfocada, sin que se altere la calidad del mensaje transmitido centralmente a través del nervio óptico.

En el caso de un ojo emétrope, $F_o = R$, siendo F_o la potencia del ojo en visión lejana. Sin embargo, cuando este ojo acomoda para obtener una imagen retiniana nítida de un objeto próximo B (*Figura 6.12*) la potencia del ojo debe ser $F_o + (-S)$. Esto es, la potencia del ojo en estos diagramas es $F_o - S$.



Figuras 6.12. Profundidad de campo alrededor del punto objeto enfocado B.

De la *Figura 6.12 b* se deduce la siguiente relación

$$\frac{s'_1}{s'_1 - r'} = \frac{d_p}{cd}$$

siendo d_p y cd los diámetros de la pupila y del círculo de difusión respectivamente

$$\text{como, } s'_1 = \frac{n'}{S'_1} \quad \text{y} \quad r' = \frac{n'}{R'}$$

Sustituyendo se obtiene,

$$\frac{R'}{R' - S'_1} = \frac{d_p}{cd} \quad \text{y} \quad R' - S'_1 = \frac{cd}{d_p} R'$$

Así,

$$S'_1 = R' \times \left(1 - \frac{cd}{d_p}\right)$$

Poniendo $S'_1 = S_1 + (F_o - S)$ y $R' = F_o$, se llega a,

$$S_1 = S - \frac{cd}{d_p} F_o$$

En esta ecuación S es la distancia dióptrica a la que está enfocado el ojo, y S_1 es la distancia dióptrica objeto más próxima a la que se puede situar otro objeto enfrente del ojo y tener todavía una imagen aparentemente nítida.

Un planteamiento similar para la posición dióptrica de B_2 da

$$S_2 = S + \frac{cd}{d_p} F_o$$

La profundidad de campo alrededor de B , en términos dióptricos es entonces:

$$S_2 - S_1 = 2 \frac{cd}{d_p} F_o$$

La profundidad de campo lineal es $B_2 B_1 = s_1 - s_2$

Estas ecuaciones de profundidad de campo dependen claramente del valor que se escoja para el máximo diámetro permitido del círculo borroso. Uno de los métodos para elegir este diámetro es el que se usa en fotografía,

donde se permite un diámetro del círculo borroso igual a $f/1000$, donde f es la longitud focal de la lente de la cámara. En el caso del ojo emétrope $f = 22,22$ mm, así $cd = f/1000 = 22,22/1000 = 0,02222$ mm. Si suponemos un ojo mirando al infinito ($S = 0$) y con un diámetro de pupila de 4 mm;

$$S_1 = S - \frac{cd}{d_p} F_o = 0 - \frac{0,02222}{4} \times 60 = -0,3333D.$$

Esto significa que un objeto se puede ver nítidamente a una distancia de $s_1 = \frac{1}{S_1} = \frac{1}{-0,333} = -3,00m$ del ojo mientras que éste está enfocando a lo lejos.

Una ventaja práctica de este hecho se da en el gabinete de optometría, donde el examen se realiza a una distancia de 6 metros y por lo tanto el sujeto no necesita acomodar. Para la mayoría de los diámetros pupilares esta distancia cae dentro de la profundidad de campo para un objeto en el infinito.

El tamaño de la pupila es crítico. A menor tamaño pupilar mayor profundidad de campo (*Figura 6.13*). Veamos algunos ejemplos:

Para un diámetro pupilar de 4 mm la profundidad de campo en visión lejana se extiende desde el infinito hasta aproximadamente 3,5 m delante del ojo, y para un punto de fijación situado a 1 m de distancia varía desde 1,4 m hasta 0,8 m delante del ojo.

Con un diámetro pupilar de 2 mm la profundidad de campo en visión lejana se extiende desde el infinito hasta 2,3 m, y mirando a 1 m de distancia la profundidad de campo varía desde 1,8 m hasta 0,7 m delante del ojo.

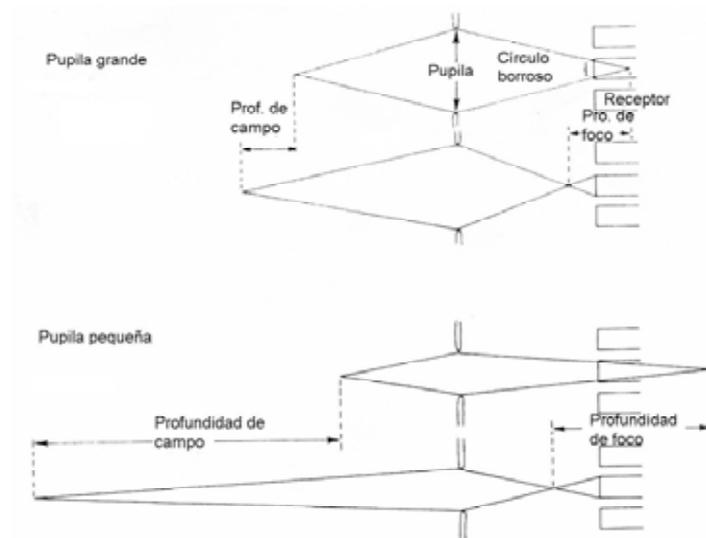


Figura 6.13. Profundidad de campo y profundidad de foco para dos tamaños de pupila.

La profundidad de foco del ojo disminuye con la acomodación, la profundidad se hace tanto menor cuanto más cercano se encuentra el objeto. Esta disminución es en parte compensada por la contracción pupilar. Una pupila pequeña supera errores menores de refracción porque aumenta la profundidad de campo del ojo y la profundidad de foco. Con la pupila pequeña entran haces de luz más estrechos y se producen círculos de difusión más pequeños que están limitados a pocos conos en la fovea, en consecuencia la imagen en la retina escasamente enfocada mejora.

Por lo tanto, podemos entender porque la lectura es más fácil cuando aumenta la iluminación y la pupila se contrae aumentando la profundidad de campo y como de esta manera la necesidad de una acomodación precisa se reduce en la lectura. Además, normalmente la diferencia en cm de la parte superior e inferior de la página de un libro no exige un cambio de foco.

Dado que las imágenes retinianas nunca son verdaderamente exactas, el sistema visual está procesando constantemente imágenes algo borrosas. Así,

esta tolerancia a la borrosidad amplía considerablemente la profundidad de campo aparente, de modo que el ojo puede estar $\pm 0,25$ D fuera de foco sin estimular cambio acomodativo.

7 PRESBICIA

La presbicia es el estado refractivo del ojo, en el cual a causa de una disminución fisiológica de la amplitud de acomodación debido al aumento de la edad, el grado de acomodación no es suficiente para mantener una visión nítida a la distancia habitual de trabajo y existe dificultad para la visión próxima.

En consecuencia, con la edad el punto próximo se aleja de forma progresiva y cada vez resulta más difícil ver claramente los objetos cercanos. La presbicia aparece cuando el punto próximo ha retrocedido más allá de la distancia a la que el individuo está acostumbrado a leer o a trabajar o más allá de la distancia a la que sus brazos le permiten sostener la página impresa.

7.1 VARIACIÓN DE LA AMPLITUD DE ACOMODACIÓN CON LA EDAD

En los primeros años de vida la amplitud de acomodación es de 14 D, situándose el punto próximo a 7 cm del ojo. Con el aumento de la edad, esta amplitud de acomodación comienza a disminuir y a los 36 se ha reducido a unas 7 D. A los 45 años la amplitud es sólo de 4 D y el punto próximo está a

25 cm. Cuando se alcanzan los 60 años ya sólo existe 1 D de acomodación (Figura 7.1).

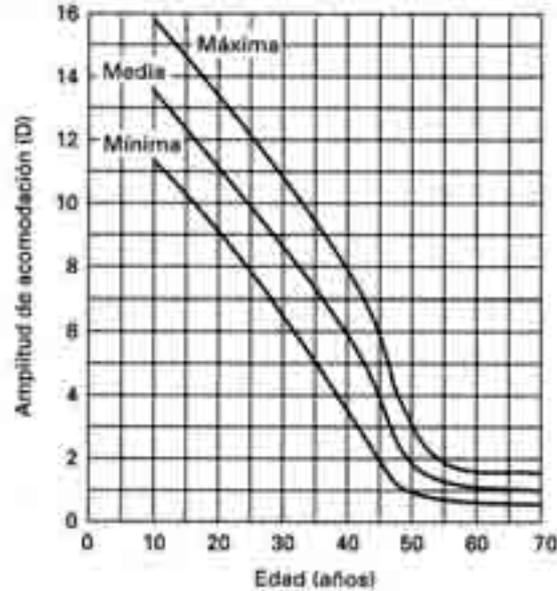


Figura 7.1. Variación de la amplitud de acomodación con la edad.

Donders realizó un estudio comparativo de los resultados obtenidos en personas de distintas edades y dedujo la siguiente relación para la amplitud de acomodación y la edad (E): $Am = 12,5 - 0,2 E$

La disminución más importante de la capacidad de acomodación se produce entre los 20 y 40 años, y aunque no suele ir acompañada de molestia alguna, sí explica la aparición en estas edades de descompensaciones o trastornos de la visión binocular (por ejemplo, insuficiencia en la convergencia) debido a la relación que existe entre la acomodación y la convergencia.

En la mayoría de los casos la visión cercana se realiza a una distancia media de 28 a 30 cm de los ojos, y por lo tanto en el *emétrope* el límite real de visión nítida se alcanza a los 45 años cuando todavía queda una amplitud de

acomodación de 3,5 a 4,00 D. Sin embargo esto supondría trabajar continuamente en el punto próximo y por lo tanto ejercitar el total de la acomodación que casi nunca se tolera de forma prolongada. La lectura no es posible si el sujeto emplea el máximo esfuerzo de acomodación, ya que aparece la fatiga y la acomodación comienza a relajarse, por lo que para ver de una manera clara el sujeto se verá obligado a alejar el texto.

Para que un sujeto pueda sostener sin fatiga y de una manera prolongada un esfuerzo acomodativo de cierta intensidad, es necesario que no se utilice toda la amplitud de acomodación. Se debe mantener en reserva alrededor de la mitad o un tercio de la acomodación.

7.2 EVOLUCIÓN DE LA PRESBICIA CON LA REFRACCIÓN

En el *emétrope* la presbicia aparece entre los 40 y 45 años, a una edad en que todavía existe una acomodación suficiente para enfocar a la distancia de lectura. El sujeto acomoda a esa distancia, pero no es capaz de sostener esa acomodación durante cierto tiempo. Para trabajar o leer sin fatiga habrá que suplir la acomodación con lentes convergentes.

El *hipermétrope* tiene el punto próximo más lejos que el de un emétrope, y por esta razón los síntomas de presbicia aparecerán antes.

Un hipermétrope de 3,00 D necesitará ejercitar 7 D de acomodación para ver nítidamente a 25 cm. En consecuencia puede mostrar síntomas de presbicia hacia los 25 años. Sin embargo, en el hipermétrope la primera compensación para lejos puede serle útil en visión próxima y se podrá posponer la necesidad de una adición próxima.

En realidad, la presbicia en el hipermétrope aparece a la misma edad que en la emetropía. Pero al existir una hipermetropía latente no compensada se hace más evidente el trastorno visual.

En la *miopía* el punto próximo está más cerca y por lo tanto un miope de 4,00 D sin compensar nunca presentará los síntomas de la presbicia. En realidad la presbicia aparece a la misma edad que en el emétrope, pero el ojo

miope no compensado o hipo compensado a los 45 años es capaz de leer sin compensación próxima, lo que no ocurre cuando la ametropía está compensada totalmente en visión lejana.

La presbicia es un término relativo, que depende no sólo de la edad sino también de la refracción y varía igualmente con la constitución y las costumbres como por ejemplo la distancia de lectura o de trabajo.

Aunque la presbicia se nota alrededor de los 45 años, una persona que por su ocupación requiera una visión próxima exacta, presentará síntomas de presbicia muy pronto. Mientras que una persona que no usa sus ojos para una visión próxima precisa, no lo notará hasta que encuentre dificultad por ejemplo para leer el periódico.

La distancia de trabajo es un factor a tener en cuenta que varía con la profesión del sujeto: el carpintero o el contable estarán más cómodos trabajando a 30 ó 35 cm, mientras que el relojero o la bordadora de la misma edad y estado refractivo tendrán que utilizar gafas para ver a su distancia de trabajo de 20 cm.

Una persona que tiene la costumbre de leer con el libro sobre las rodillas experimentará molestias más tarde que el que suele leer desde más cerca.

7.3 ADICIÓN DE CERCA Y CÁLCULO DE LA ACOMODACIÓN OCULAR

La amplitud de acomodación total no se puede usar durante un tiempo prolongado, pero si se puede usar una fracción, generalmente la mitad, de forma sostenida. Así, si S_L es la distancia dióptrica de trabajo y Am_L es la amplitud de acomodación oftálmica la adición necesaria para visión próxima es:

$$Ad = / S_L / - 1/2 Am_L$$

La adición prescrita depende de la distancia de trabajo del paciente y de la amplitud de acomodación actual y nunca se debe basar sólo en la edad.

Ejemplo:

Un ojo se compensa para visión lejana con $+4,00$ D a 14 mm del ojo reducido. La amplitud de acomodación oftálmica es de 3 D y la distancia de trabajo de -400 mm desde el plano de la lente. ¿Cuál es la adición teórica necesaria si está basada en la mitad de la amplitud de acomodación dada? ¿Cuál es la acomodación ocular que utiliza a esa distancia de trabajo y a qué fracción de la amplitud de acomodación ocular corresponde? (Figura 7.2)

$$\text{Como, } s_L = -400\text{mm} \quad S_L = -2,5 \text{ D}$$

$$Ad = 2,5 - 1/2 \cdot 3,00 = +1,00 \text{ D}$$

La refracción ocular o ametropía R es:

$$F_L = +4,00 \text{ D} \quad f = +250 \text{ mm}$$

$$r = f - d \quad r = 250 - 14 = +236 \text{ mm}$$

$$R = +4,24 \text{ D}$$

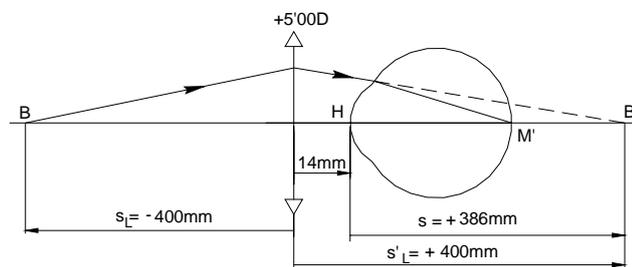


Figura 7.2. Diagrama correspondiente al ejemplo de un ojo hipermetrope con la compensación cercana observando un objeto próximo.

Con la adición de +1,00 D, la compensación para visión próxima F_p ($F_L + Ad$) es +5,00 D. Por lo tanto, en la visión próxima a -400 mm

$$S_L = -2,5 \text{ D}$$

$$F_p = +5,00 \text{ D}$$

$$S'_L = S_L + F_p$$

$$S'_L = -2,5 + 5,00 = +2,50 \text{ D}$$

$$s'_L = +400 \text{ mm}$$

$$s = s'_L - d \quad s = 400 - 14 = 386 \text{ mm}$$

$$S = +2,59 \text{ D}$$

La acomodación ocular que utiliza es,

$$A = R - S = 4,24 - 2,59 = 1,65 \text{ D}$$

Se puede comprobar que esta acomodación ocular corresponde aproximadamente a la mitad de la acomodación ocular total. Es decir, se corresponde con la fracción mitad utilizada con la amplitud de acomodación oftálmica para determinar la prescripción de cerca.

La amplitud de acomodación ocular total sin la adición se puede calcular sabiendo que, como la amplitud de acomodación oftálmica es de 3,00 D, el test objeto tiene que estar a la distancia dióptrica de -3,00 D del plano de la gafa cuando se usa la compensación lejana. La distancia dióptrica P se obtiene de,

$$S_L = -3,00 \text{ D}$$

$$F_L = +4,00 \text{ D}$$

$$S'_L = S_L + F_L = -3,00 + 4,00 = +1,00$$

$$s'_L = +1000 \text{ mm}$$

$$p = s'_L - d = 1000 - 14 = +986 \text{ mm}$$

$$P = +1,01 \text{ D}$$

Por lo tanto,

$$Am = R - P = 4,24 - 1,01 = 3,23 \text{ D}$$

La acomodación ocular que se utiliza con la adición es 1,65 D del total disponible (3,23 D), siendo la fracción 1,65/3,23 o 0,51. Esto es casi idéntico a la fracción de amplitud de acomodación oftálmica adoptada para prescribir la adicción.

7.4 CAUSAS DE LA DISMINUCIÓN DE LA AMPLITUD DE ACOMODACIÓN CON LA EDAD

La presbicia es un proceso fisiológico de envejecimiento del ojo con disminución del poder de refracción.

Hay varias teorías que tratan de explicar este hecho:

Unas piensan que es consecuencia de una esclerosis de la parte central del núcleo del cristalino; pero es inadmisibles suponer que un núcleo esclerosado rodeado de masas blandas no se deforme por efecto de la elasticidad capsular.

Otras creen que se debe a un debilitamiento del músculo ciliar con la edad. Se fundamentan en que con la edad aumenta el tejido conjuntivo entre

las fibras musculares, lo que en el anciano disminuye las posibilidades de contracción. Pero tiene en contra que la disminución de la amplitud de acomodación aparece a una edad en que la musculatura está en franco desarrollo.

Según Magitot se producen modificaciones de los elementos histológicos constituyentes del cristalino, como son las formaciones de las zonas de discontinuidad óptica y los cambios de índice.

Para Nordman, debido a la lenta transformación química del cristalino, los cambios de forma y las modificaciones intra capsulares se hacen más y más difíciles. La inmovilidad de la cápsula sería forzada, debido a la resistencia progresivamente mayor de la sustancia lenticular.

Según Korets y Handelman (1.987) la presbicia parece constituir un trastorno de la geometría, resultante en gran medida del cambio de forma y de las relaciones angulares entre el cristalino y las zónulas.

Como se sabe, el cristalino se encuentra desacomodado cuando está sometido a la máxima tensión de las zónulas, y alcanza la máxima acomodación, es decir, la mayor curvatura y capacidad de refracción, cuando está sometido a la mínima tensión de las zónulas.

El crecimiento en espesor del cristalino a lo largo de la vida da lugar a un cristalino sin acomodar con una forma cada vez más curvada. Se ha comprobado que en personas de menos de 45 años, cuanto más viejo era el cristalino, más acusada era su curvatura para cualquier estado de acomodación. Por ejemplo, un cristalino de 33 años era más curvo que uno de 19 años para la misma distancia de cerca.

Brow denominó *paradoja del cristalino* a ese incremento de curvatura con la edad, pues lo predecible es que los cristalinos de curvatura más cerrada dieran mayor poder de refracción que los de curvatura menor.

Además durante la acomodación y con la misma cantidad de movimiento, en los ojos maduros se registra un cambio de foco menor que en los jóvenes. También el intervalo total del movimiento disminuye gradualmente con la edad. A partir de los 45 años aproximadamente se ha visto que el frente del cristalino no puede cambiar de forma ni por tanto acomodarse.

Ahora se sabe que las zónulas de Zinn configuran alrededor del cristalino, tres anillos de filamentos, un anillo se une por el ecuador y los otros dos, algo por delante y por detrás de él. Las zónulas no podrán relajarse si por haber engrosado el cristalino el frente queda tan lejos del músculo ciliar que la lente mantiene tensas las zónulas.

¿Por qué para enfocar el cristalino viejo tiene que ser más curvo que el joven?

El índice de refracción del cristalino disminuye con la edad debido al cambio de naturaleza del citoplasma de las fibras del cristalino. Los mecanismos de compensación que intervienen serán, el aumento de curvatura de la superficie del cristalino y el desarrollo de nuevas zonas de discontinuidad (superficies refractoras del interior de la lente) cada vez más curvadas. La contribución de las zonas de discontinuidad óptica al poder de refracción global del ojo va ganando importancia con la edad. En el cristalino joven las bandas o zonas de discontinuidad son escasas y tenues. Conforme envejece el cristalino, crece el número y la claridad de las zonas y en la quinta década o poco después las zonas se fusionan.

La disminución del índice de refracción con la edad se explica por el aumento de partículas de α -cristalina insoluble que forman agregados (la α -cristalina es la principal proteína que compone el cristalino).

El índice de refracción de una solución depende de la naturaleza y concentración de sus solutos. Al añadir proteína soluble a un medio acuoso, aumenta el índice del medio, por el contrario, si una gran fracción de la proteína forma partículas insolubles de gran tamaño, el índice disminuye.

Se ha comprobado que cuando el humor vítreo se licua, de nada sirven los mecanismos de compensación y el cristalino pierde la capacidad de acomodación. A la edad de la presbicia, el humor vítreo geliforme, empieza a licuarse, y a perder su ultra estructura. La contribución exacta de esa licuefacción a la pérdida de la capacidad de acomodación se desconoce.

8 MOTILIDAD OCULAR

En este tema se estudiará como se mueven los ojos, individual y binocularmente, ya que los movimientos de los ojos y su coordinación son fundamentales para tener visión binocular.

8.1 DIRECCIONES DE LOS MOVIMIENTOS OCULARES

8.1.1 Rotaciones monoculares: posiciones básicas de los ojos, centro de rotación, planos y ejes de referencia, ducciones.

Las posiciones básicas de los ojos son tres. La *posición primaria* es cuando el ojo mira de frente un objeto situado en el infinito, estando la cabeza y los hombros derechos. A partir de esta posición se definen las posiciones secundarias y terciarias de mirada que resultan de las rotaciones del ojo.

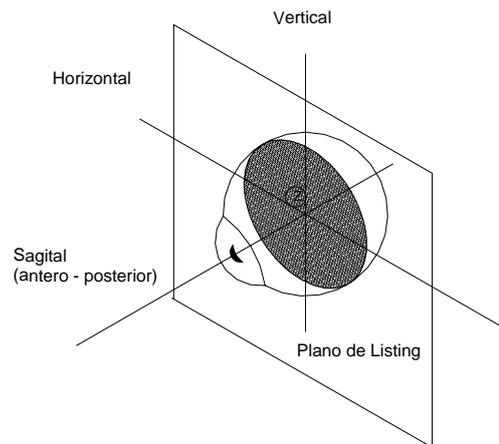


Figura 8.1. Plano de Listing: sección vertical que atraviesa el centro de rotación Z, perpendicular a la línea primaria del ojo. Diagrama de los ejes de Fick.

Estos movimientos de rotación del ojo se realizan en torno al *centro de rotación*. Los primeros autores lo consideraron un punto fijo pero actualmente se sabe que se desplaza con los movimientos oculares, lo que significa que el ojo realiza movimientos de traslación asociados a los de rotación; aunque son insignificantes y no se tendrán en cuenta. Los movimientos en torno al centro de rotación se analizan en función de un sistema de coordenadas fijo en la órbita y representado por tres ejes perpendiculares entre sí que pasan por el centro de rotación y que se denominan *ejes de Fick* (Figura 8.1). El eje Z coincide con el eje visual cuando el ojo está en posición primaria.

Las rotaciones del ojo en torno de estos tres ejes se llaman *ducciones* y son las siguientes:

- a) Movimientos horizontales en torno del eje vertical (Y):
- Adducción: cuando la córnea se dirige nasal o hacia dentro.
 - Abducción: cuando la córnea se dirige lateralmente o temporalmente hacia fuera.

b) Movimientos verticales en torno al eje frontal (X):

- Supraducción o elevación: cuando la córnea se dirige hacia arriba
- Infraducción o depresión: cuando la córnea se dirige hacia abajo.

c) Movimientos en torno al eje antero posterior (Z), son movimientos de torsión:

- Incicloducción o intorsión: cuando el extremo superior del meridiano vertical de la córnea se dirige hacia dentro o nasalmente.
- Excicloducción o extorsión: cuando el extremo superior del meridiano vertical de la córnea se dirige hacia fuera o temporalmente.

La torsión no puede ser inducida por un esfuerzo voluntario, pero puede resultar de ciertos reflejos, por ejemplo, la compensación parcial por una inclinación de la cabeza hacia un hombro.

Las cuatro *posiciones secundarias de mirada* resultan de la rotación cardinal del ojo ya sea alrededor del eje vertical (Y) o del eje horizontal (X) en el plano de Listing, de la siguiente manera:

<u>Rotación cardinal</u>	<u>Movimiento de la córnea</u>
1. Elevación (o supraducción)	Hacia arriba
2. Depresión (o infraducción)	Hacia abajo
3. Abducción	Hacia afuera de la nariz
4. Adducción	Hacia la nariz o hacia dentro

Cuando los ojos, a partir de la posición primaria, giran en entorno de cualquier eje oblicuo situado sobre el plano de Listing, se dirigen a posiciones terciarias. Por lo tanto, la *posición de mirada terciaria* es en una dirección oblicua

de la mirada que puede ser hacia: arriba-afuera, arriba-adentro, abajo-afuera y abajo-adentro.

En la *Figura 8.2* se muestran diferentes posiciones de mirada adoptadas por cada ojo individualmente y también el movimiento binocular resultante.

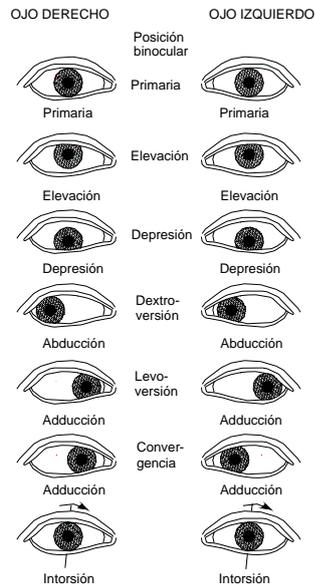


Figura 8.2. Movimientos oculares desde el punto de vista del examinador.

8.1.2 Movimientos binoculares

Las posiciones secundarias de mirada definidas anteriormente se aplican a un solo ojo. Si ambos ojos se mueven en un mismo sentido, el movimiento binocular resultante se llama *versión* y en el caso de que los ojos giren en sentidos opuestos se llama *vergencia* (*Figura 8.2*).

Las *versiones* son movimientos conjugados donde los dos ojos se desplazan en la misma dirección y sentido. La distancia entre el objeto fijado y el punto medio de la línea que une los dos centros de rotación se mantiene fija.

Los tipos de versiones según la dirección y el sentido de movimiento a partir de la posición primaria son los siguientes:

- a) Lateroversiones (movimientos horizontales)
 - Dextroversión: las córneas se dirigen hacia el lado derecho, el ojo izquierdo aduce y el ojo derecho abduce.
 - Levoversión: las córneas se dirigen hacia el lado izquierdo.
- b) Versiones verticales (movimientos verticales)
 - Supraversión: las córneas se dirigen hacia arriba.
 - Infraversión: las córneas se dirigen hacia abajo.
- c) Cicloversiones (versiones torsionales)
 - Dextrocicloversión: las extremidades superiores de los meridianos verticales de las córneas se dirigen hacia la derecha.
 - Levocicloversión: las extremidades superiores de los meridianos verticales se dirigen hacia la izquierda.

Cuando los ojos se dirigen hacia posiciones terciarias están realizando combinaciones de versiones horizontales y verticales. Por ejemplo, hacia la derecha y arriba: dextrosupraversión.

Las *vergencias* son movimientos disyuntivos donde los dos ojos se desplazan en la misma dirección y en sentido opuesto. Los tipos de vergencias según la dirección y el sentido del movimiento son los siguientes:

- a) Vergencias horizontales:
 - Convergencia: cuando la fijación cambia desde una distancia relativamente lejana a un objeto más próximo, ambos ojos adducen y los ejes visuales convergen entre sí.
 - Divergencia: ambos ojos abducen y los ejes visuales divergen entre sí.

b) Vergencias verticales

- Divergencia vertical positiva: el ojo derecho se eleva y el ojo izquierdo queda inmóvil o en depresión.
- Divergencia vertical negativa: el ojo izquierdo se eleva y el ojo derecho queda inmóvil o en depresión.

c) Vergencias torsionales

- Inciclovergencia: los dos extremos superiores de los meridianos verticales de las córneas se dirigen nasalmente.
- Exciclovergencia: en este caso se dirigen temporalmente.

También puede haber combinaciones entre versiones y vergencias. Por ejemplo, cuando se mira un objeto que se desplaza de la izquierda a la derecha y al mismo tiempo se aproxima. Se realiza una dextroversión combinada con una convergencia. El ojo derecho abduce algo y el ojo izquierdo aduce mucho.

8.2 LOS MÚSCULOS EXTRAOCULARES

La forma de la órbita humana es aproximadamente piramidal, estando la base cuadrada hacia fuera. Las paredes nasales de la órbita izquierda y derecha son aproximadamente paralelas, mientras que las dos paredes temporales forman aproximadamente un ángulo recto entre sí. Así, los ejes de las órbitas divergen en unos 22° del plano medio (*Figura 8.3*).

El ojo gira en la cavidad gracias a los seis músculos extrínsecos o extraoculares, los cuatro rectos y los dos oblicuos. Los cuatro rectos y el oblicuo superior tienen su origen en un anillo tendinoso que rodea al nervio óptico en el vértice de la órbita y solo el oblicuo inferior nace en la parte inferior de la órbita.

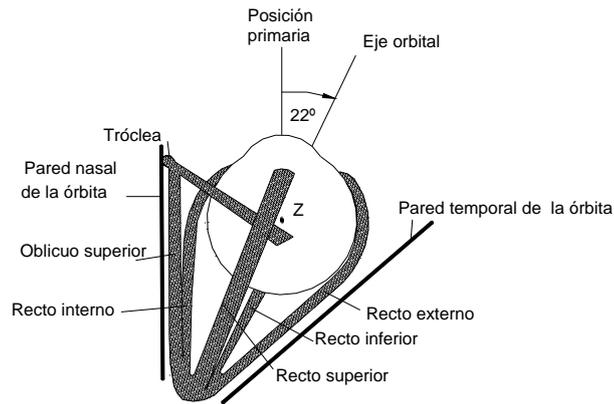


Figura 8.3. Representación esquemática de la órbita derecha y de los músculos extraoculares vistos desde arriba, estando oculto el oblicuo inferior. Z señala el centro de rotación ocular.

Los músculos rectos se dirigen divergiendo hacia delante hasta insertarse en el globo ocular donde establecen un arco de contacto entre 5 y 8 mm. El oblicuo superior, el más largo de los músculos extraoculares, se extiende desde el vértice de la órbita hacia delante hasta el ángulo superior de la parte nasal de la órbita. Allí su tendón pasa a través de un anillo llamado tróclea y cambia su dirección, dirigiéndose a su inserción en la posición trasera de la esclera, detrás del centro de rotación del ojo. El oblicuo inferior se origina en el ángulo nasal inferior de la parte externa de la órbita y pasa diagonalmente hacia atrás hasta su inserción en la esclera trasera inferior.

Esta panorámica simplificada de las inserciones de los músculos (*Figura 8.4*) es suficiente para deducir los efectos de sus contracciones, tanto en posición primaria como en la posición oblicua de mirada. En posiciones extremas, la excursión normal del ojo está también regulada por unos ligamentos de contención o control, que tienen por función impedir la contracción muscular más allá de un límite adecuado, así como contribuir a que los movimientos oculares se realicen en forma armónica y suave. Son más evidentes en los rectos horizontales. A veces, los músculos o los ligamentos de control están en una posición incorrecta produciendo unos movimientos oculares anormales.

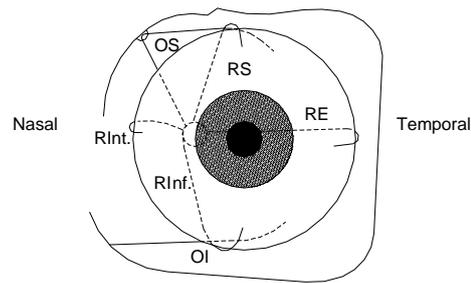


Figura 8.4. Representación esquemática de la órbita izquierda y de los músculos extraoculares vistos de frente: OS oblicuo superior, RS recto superior, RInt recto interno, RE recto externo, RInf recto inferior, OI oblicuo inferior.

Los músculos extraoculares están inervados por tres de los nervios craneales: motor ocular común (III par), patético (IV par) y motor ocular externo (VI par). El III par inerva a todos los músculos extraoculares excepto al oblicuo superior que es inervado por el IV par y el recto externo que es inervado por el motor ocular externo.

8.3 ACCIÓN DE LOS MÚSCULOS EXTRAOCULARES

Para comprender el modo de acción de los músculos extraoculares, es necesario hacer referencia a algunos conceptos básicos, indispensables para la comprensión de los mecanismos de acción de los músculos.

8.3.1 Mecánica muscular

El resultado de la contracción de un músculo cualquiera sobre el globo ocular depende de su línea de acción, su plano de acción, la posición del eje visual con relación al plano de acción y de la situación de la inserción ocular con relación al centro de rotación, hacia delante o hacia atrás del mismo

Línea de acción muscular

Es la línea determinada por el punto medio del origen orbitario del músculo y el punto medio de la inserción fisiológica (*Figura 8.5*), siendo ésta la línea formada por el cuerpo muscular cuando entra en contacto con la esclera. Para el oblicuo superior se considera la tróclea en lugar de su origen orbitario.

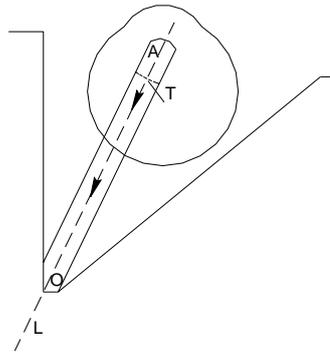


Figura 8.5. Línea de acción muscular. Esquema de un recto superior. A = inserción anatómica; O = origen; T = línea formada por el cuerpo muscular cuando entra en contacto con el ojo (inserción fisiológica o línea tangencial); L = línea de acción muscular.

La línea de acción define la dirección en que se ejerce la fuerza muscular. La distancia entre la inserción fisiológica (T) y el origen del músculo (O) se mantiene inalterable durante la contracción de éste. Por el contrario la inserción anatómica (A) se aproxima al origen a medida que el músculo se contrae. Esto significa que la dirección de la acción del músculo no se modifica durante su contracción, pues está determinada por el punto medio (punto tangencial) de la inserción fisiológica, la cual funciona como inserción efectiva y por eso se le llama inserción fisiológica.

Plano de acción

Es el plano determinado por la línea de acción del músculo y por el centro de rotación del globo. Por ejemplo, el plano de acción de los músculos

rectos horizontales coincide aproximadamente con el plano horizontal del ojo cuando éste está en posición primaria.

Arco de contacto

Se denomina arco de contacto a la zona de contacto del músculo en el globo ocular comprendida entre la inserción anatómica y la inserción fisiológica (*Figura 8.6*). Varía en extensión según el grado de contracción del músculo, disminuyendo a medida que el músculo se contrae y viceversa. La acción rotatoria de un músculo es máxima mientras exista un arco de contacto y cuando la tracción se ejerce perpendicularmente al radio (r) que parte del punto de contacto (inserción fisiológica).

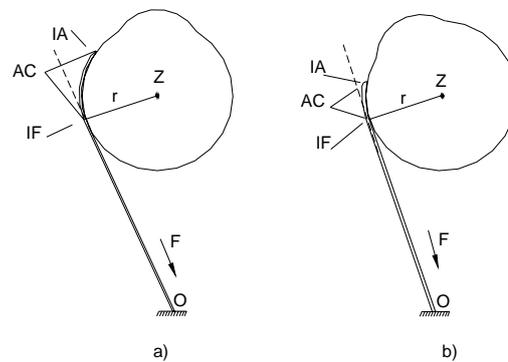


Figura 8.6. Arco de contacto y su importancia funcional. IA = inserción anatómica; IF = inserción fisiológica; AC = arco de contacto; O = origen muscular; F = fuerza muscular. A) ojo en posición primaria; B) ojo rotado por acción de la contracción muscular.

El arco de contacto del oblicuo inferior es muy largo mientras que el del oblicuo superior es muy corto. Esto determina importantes diferencias en las acciones de ambos músculos, aunque sus planos de acción sean muy semejantes con relación al ojo.

Si existen adherencias entre el arco de contacto y el globo ocular, el movimiento ocular será bloqueado.

Posición del eje visual con relación al plano de acción

La posición del eje visual respecto al plano de acción es fundamental en el modo de acción de los músculos extraoculares. El movimiento será simple si el eje visual está contenido en plano de acción. Por el contrario, el movimiento será complejo si el eje visual no está contenido en el plano de acción. Para obtener el movimiento complejo, se deben estudiar sus componentes horizontal, vertical y antero-posterior. En este caso, la acción del músculo será triple: una ducción horizontal con una vertical y una torsional.

Situación de la inserción ocular con relación al centro de rotación

Si la inserción está por delante del centro de rotación, el movimiento del polo corneal se hará hacia el músculo en contracción (caso de los músculos rectos). Si por el contrario, la inserción está por detrás del centro de rotación, el movimiento del polo corneal se efectuará en dirección opuesta al músculo en contracción (caso de los oblicuos). En la *Figura 8.7* se muestran los dos casos.

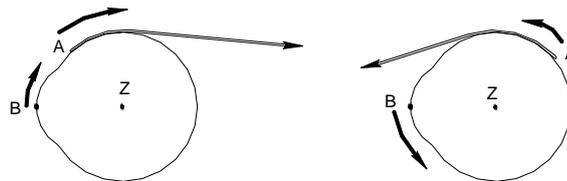


Figura 8.7. Situación de la inserción ocular con relación al centro de rotación en el caso a) de un músculo recto y en el caso b) de un músculo oblicuo.

8.3.2 Acciones monoculares principal y secundaria

El modo de acción de un músculo depende principalmente de la posición de su plano de acción con relación al eje visual. Por ello, la acción del músculo se estudia en función de la posición del ojo en el momento en que se inicia la contracción, porque la posición absoluta del plano de acción de cada

músculo y su inclinación en relación con los ejes de Fick varía de acuerdo con la posición del globo en la órbita. Así, cuando el ojo cambia de posición primaria a posición secundaria, la relación entre el eje visual y el plano de acción varía y en consecuencia la acción muscular puede cambiar.

Las acciones individuales de los músculos cuando el ojo está en posición primaria y en otras posiciones de mirada (abducción y adducción) son las siguientes:

Rectos horizontales

El plano de acción del recto interno y externo es horizontal. En la posición primaria de mirada no tienen más que una acción, ya que el eje visual está contenido en su plano de acción. Como la inserción del *recto externo* está en el cuadrante temporal del globo, sobre el meridiano horizontal y por delante del centro de rotación (*Figura 8.8*), este músculo es abductor, es decir lleva la parte anterior del globo hacia fuera. La inserción del *recto interno* está en el cuadrante nasal, sobre el meridiano horizontal y por delante del centro de rotación, por lo tanto el músculo es adductor, lleva hacia adentro, en el plano horizontal la parte anterior del globo. Esta situación no se modifica con los movimientos de adducción y abducción, pues el eje visual siempre está contenido en el plano de acción.

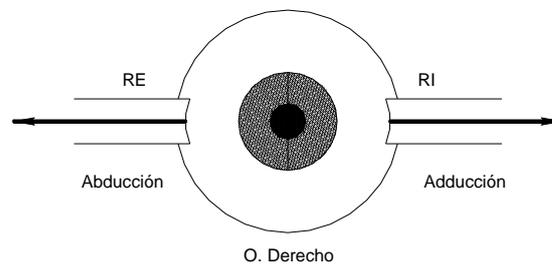


Figura 8.8. Acción de los rectos horizontales en posición primaria de mirada.

Cuando el ojo está en otras posiciones de mirada distinta a la primaria, sus acciones musculares son clínicamente menos importantes. Cuando el ojo se eleva, el eje visual se inclina con relación a los planos de acción y estos músculos adquieren, secundariamente, acción elevadora y torsional o refuerzan esta elevación. Cuando el ojo mira hacia abajo tiene acción depresora y torsional secundarias.

Rectos verticales

Cuando el ojo está en posición primaria, el plano de acción de los rectos verticales no contiene al eje visual (*Figura 8.9*). Las líneas de acción forman aproximadamente un ángulo de 23° (20° a 27° según la distancia interpupilar) con el eje visual, por lo que la acción del músculo es compleja.

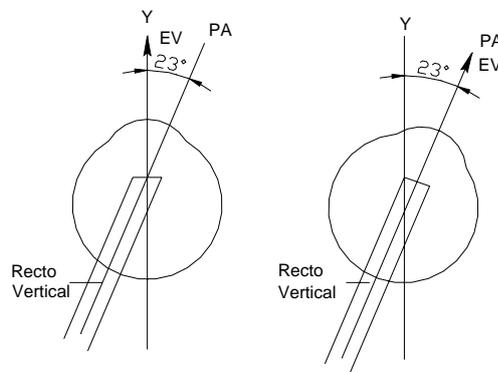


Figura 8.9. Acción de los músculos rectos verticales, estando el ojo en posición primaria y en abducción de 23° . PA = plano de acción del músculo; EV = eje visual.

La inserción oblicua del *recto superior* está en el cuadrante superior, a caballo sobre el meridiano vertical, y delante del centro de rotación (*Figura 8.10*). Cuando se contrae lleva hacia él la parte anterior del globo y produce como acción principal elevación y además adducción e intorsión.

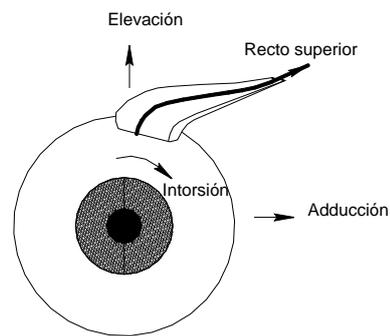


Figura 8.10. Acciones del recto superior en posición primaria de mirada.

La inserción oblicua del *recto inferior* está situada en el cuadrante inferior, por delante del centro de rotación (*Figura 8.11*). Cuando este músculo se contrae es depresor (acción principal), adductor y extorsionador.

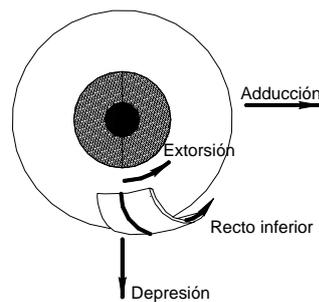


Figura 8.11. Acciones del recto inferior en posición primaria de mirada.

Por lo tanto la acción principal de estos músculos es vertical, en torno al eje X, el recto superior es elevador y el recto inferior es depresor. Las acciones secundarias son de adducción y cicloducción, siendo el recto superior intorsionador y el recto inferior extorsionador.

Cuando el ojo está en posición de abducción de 23° , el eje visual coincide con el plano de acción en los dos músculos (*Figura 8.9*) y en este caso el movimiento será simple, solo habrá acción vertical. En adducción las acciones secundarias ganan importancia y en abducción más allá de 23° , las acciones secundarias se invierten.

Oblicuos

Cuando el ojo está en posición primaria, el plano de acción de los músculos oblicuos está inclinado en relación con el eje visual, el oblicuo inferior forma un ángulo de 51° con el eje visual y el oblicuo superior un ángulo de 54° (*Figura 8.14 B*). Por lo tanto la acción de estos músculos es compleja.

La dirección de acción del oblicuo superior está definida por la línea de su porción tendinosa, entre la tróclea y su inserción oblicua en el cuadrante temporal posterior del ojo por detrás del centro de rotación (*Figura 8.12*). Así, este músculo cuando se contrae produce intorsión (acción principal), depresión y abducción.

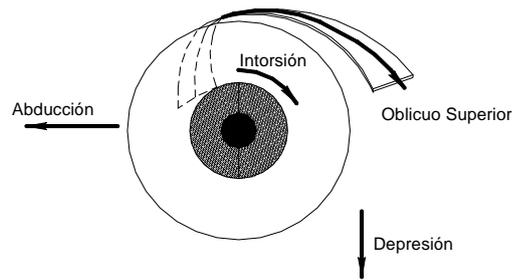


Figura 8.12. Acciones del oblicuo superior en posición primaria de mirada.

La inserción del oblicuo inferior en el globo es oblicua siendo posterior y temporal, por detrás del centro de rotación (*Figura 13*). Su acción es triple: extorsión (acción principal), elevación y abducción.

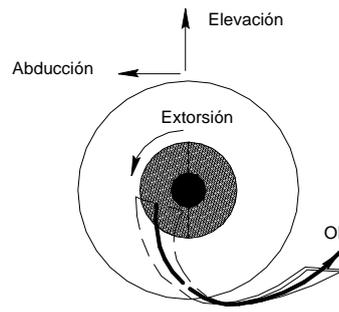


Figura 8.13. Acciones del oblicuo inferior en posición primaria de mirada.

Por lo tanto, la acción principal de estos músculos es de torsión en torno al eje Z, el oblicuo superior es intorsionador y el oblicuo inferior es extorsionador. Las acciones secundarias, en horizontal y en vertical, revisten importancia bajo el punto de vista clínico. Ambos oblicuos son abductores, el oblicuo superior es depresor y el oblicuo inferior es elevador.

Cuando el ojo aduce el eje visual se aproxima al plano de acción de los oblicuos y su acción tiende a hacerse simple, cosa que ocurriría en una hipotética adducción de 50° (Figura 8.14 A) en la cual el oblicuo superior sería solamente depresor y el oblicuo inferior elevador (acción única vertical). Actualmente se postula que el componente vertical crece con la adducción hasta 30° y más allá disminuye. En la adducción el oblicuo superior es depresor e intorsionador, y el oblicuo inferior es elevador y extorsionador.

A medida que el ojo abduce el eje visual se aproxima a la perpendicular del plano de acción (Figura 8.14 C), aumentando la acción torsional (según el concepto clásico el efecto de torsión crece con la abducción, actualmente se dice que la torsión no depende de la posición del globo). Cuando el ojo abduce, el oblicuo superior es intorsionador y abductor y el oblicuo inferior es extorsionador y abductor.

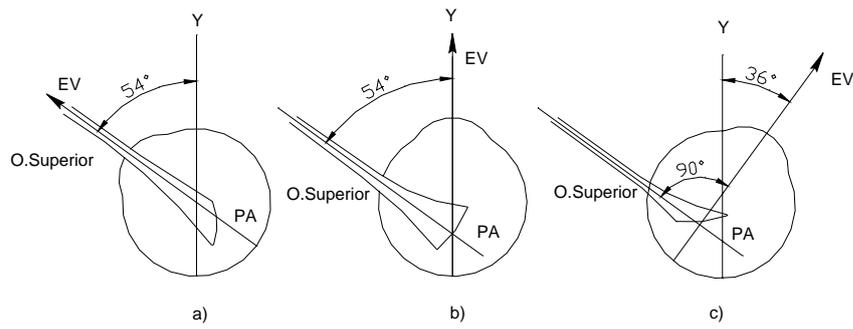


Figura 8.14. Concepto clásico sobre la acción del músculo oblicuo superior, estando el ojo en aducción de 54° (a), en posición primaria (b) y en abducción de 36° (c). PA = plano de acción; EV = eje visual.

En la *Tabla 8.1* están resumidas para la posición primaria de mirada, las acciones principales y secundarias de los músculos extraoculares, que conviene deducir recordando la anatomía de la órbita (*Figuras 8.3 y 8.4*).

Tabla 8.1. Acciones principales y secundarias de los músculos extraoculares.

Músculo	Acción principal	Acción secundaria
Recto interno	Adducción	
Recto externo	Abducción	
Recto superior	Elevación	Adducción e intorsión
Recto inferior	Depresión	Adducción y extorsión
Oblicuo superior	Intorsión y depresión	Abducción
Oblicuo inferior	Extorsión y elevación	Abducción

En otras posiciones de mirada, en los movimientos de aducción y abducción, se cumplen dos reglas: (1) Cuando el ojo está en abducción, su elevación o descenso es provocada fundamentalmente por los rectos verticales (RS y RInf), accesoriamente por los oblicuos. (2) Cuando el ojo está en aducción, su elevación o descenso es provocada fundamentalmente por los oblicuos (OI y OS), accesoriamente por los rectos verticales.

8.3.2.1 Diagramas musculares de Márquez y de Van der Hoeve

Estos diagramas representan gráficamente las acciones individuales de los seis músculos extraoculares. En el esquema de Márquez (*Figura 8.15*) las flechas indican la dirección de acción cuando el ojo está en su posición primaria. Las flechas son de longitud variable, según su importancia. Esta longitud ha sido determinada más exactamente por el esquema de Van der Hoeve (*Figura 8.16*).

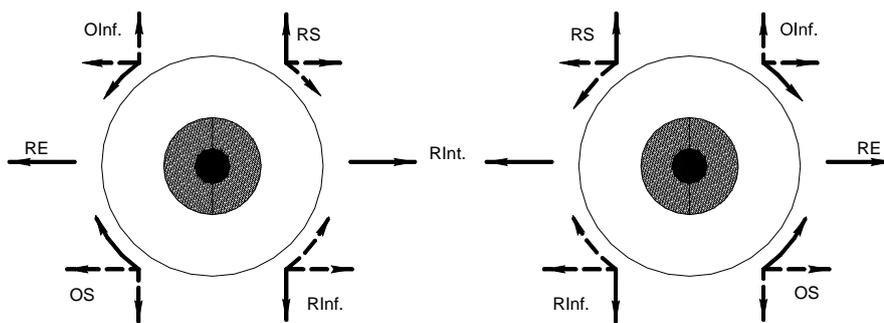


Figura 8.15. Diagrama de Márquez: acciones musculares primaria y secundaria en los dos ojos en su posición primaria. Las flechas en línea continua denotan acciones principales y las flechas en línea discontinua acciones secundarias. Notar que las longitudes de las líneas no son proporcionales a la acción efectiva. SO oblicuo superior, SR recto

superior, MR recto interno, LR recto externo, IR recto inferior, IO oblicuo inferior.

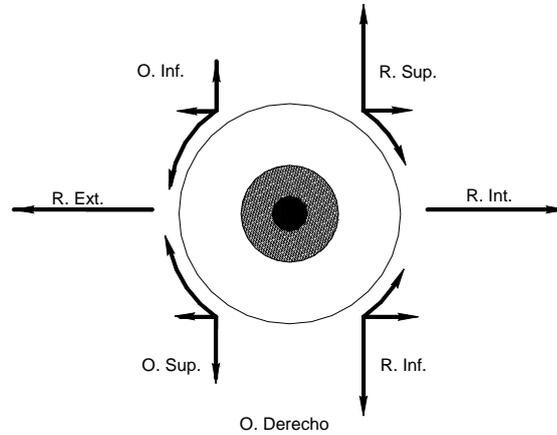


Figura 8.16. Diagrama de Van der Hoeve sobre las acciones individuales de los músculos extraoculares. La longitud de los trazos es directamente proporcional a las acciones de los músculos.

Fallo muscular y diplopia

Si uno de los músculos extraoculares dejase de funcionar eficientemente debido, por ejemplo, a una hemorragia en el músculo o una lesión del nervio que lo inerva, el ojo tenderá a desviarse de su posición normal. Además, si la acción del músculo se deteriora de forma severa y repentina en un adulto, se producirá diplopia (visión doble). Si el recto externo derecho se ve afectado (*Figura 8.17*), entonces en lugar de mirar los dos ojos, derecho hacia delante para ver un objeto lejano B, el ojo derecho adducirá porque la acción debilitada del recto externo derecho sería superada por el tono muscular normal del recto interno.

En tales casos, la imagen percibida es localizada en el espacio como si el ojo estuviera todavía en su posición primaria, como en la *Figura 8.17 (c)*. Teniendo en cuenta que, en realidad, la imagen retiniana de un objeto lejano B

cae nasalmente a la fovea derecha M'_R , la imagen percibida es proyectada incorrectamente hacia el lado temporal. Sin embargo, la imagen del ojo izquierdo es percibida delante derecho. En general, una imagen doble debida a un músculo parético o con mal funcionamiento se desplaza en la misma dirección a la rotación que la contracción de ese músculo normalmente produce.

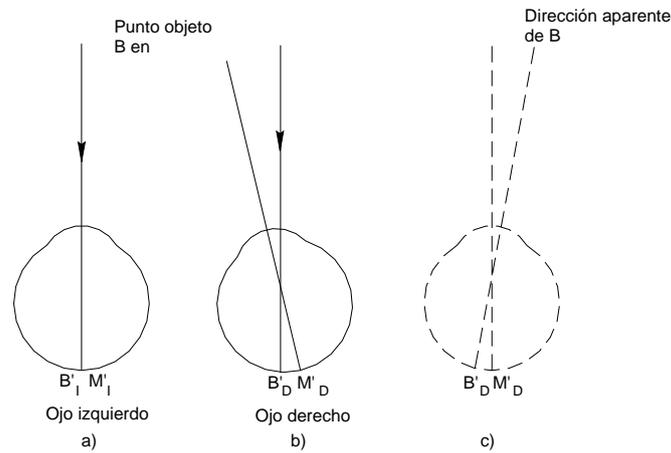


Figura 8.17. Visión doble debido a una pérdida del tono muscular en el recto externo derecho: c) ilustra la proyección de la percepción visual de la imagen en el ojo desviado.

8.4 ACCIONES MUSCULARES EN LOS MOVIMIENTOS BINOCULARES. CAMPOS DE ACCIÓN DE LOS MÚSCULOS O POSICIONES DIAGNÓSTICAS

Los movimientos oculares generalmente requieren la acción coordinada de muchos de los músculos extraoculares. El diagnóstico de una acción muscular defectuosa se puede simplificar si se pone de manifiesto que

determinadas direcciones de mirada se producen por la acción de un solo músculo en cada ojo.

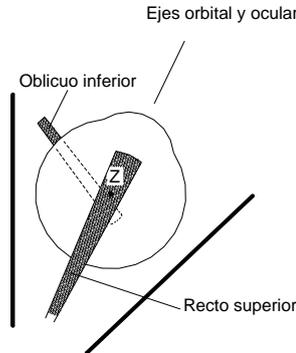


Figura 8.18. Cuando el ojo está en abducción el músculo oblicuo inferior derecho tiene menor potencia de elevación (vista de la órbita desde arriba).

En el caso del recto superior, su acción será únicamente de elevación cuando el ojo abduca un ángulo de 22° (Figura 8.9 y 8.18), ya que en esa posición la línea de acción del músculo pasa casi exactamente sobre el centro de rotación del ojo. En posición primaria, el oblicuo inferior tiene también una función elevadora. Pero su efecto de elevación es menor en la posición de abducción (Figura 8.18) que en la posición primaria. Así, cuando el ojo mira hacia arriba y afuera, el músculo empleado principalmente es el recto superior. Mediante un análisis similar, se puede encontrar la correspondiente posición de mirada para cada uno de los otros músculos.

La Figura 8.19 y la Tabla 8.2 muestran estas posiciones de mirada que representan los *campos de acción de los músculos* es decir, la posición en la que deben ponerse los ojos para estar en el campo de acción de un determinado músculo. En el ojo derecho la contracción del músculo recto inferior es la más importante cuando se mira hacia abajo y hacia la derecha. En el ojo izquierdo el músculo más importante en esta posición de mirada es el oblicuo superior izquierdo. Los músculos emparejados de esta forma se conocen como *pares musculares* o *músculos sinergistas contralaterales*.

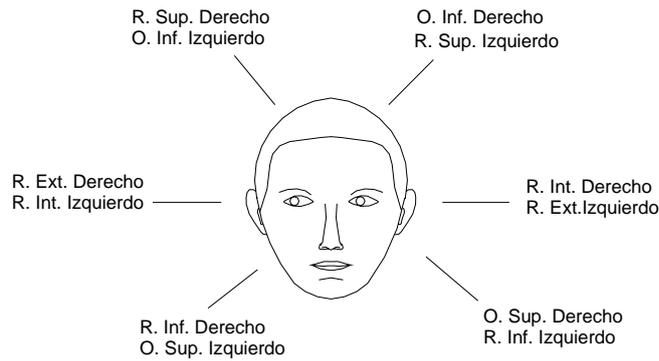


Figura 8.19. Pares musculares: vista del examinador del campo de acción de cada uno de los músculos extraoculares. Las flechas indican el sentido de la dirección ocular.

Tabla 8.2. Pares musculares y posiciones diagnósticas de mirada

Campo de acción o posición diagnóstica	Pares musculares	
	Ojo Derecho	Ojo Izquierdo
Horizontalmente a la derecha Horizontalmente a la izquierda	Recto Externo Recto Interno	Recto Interno Recto Externo
Arriba y a la derecha Abajo y a la derecha	Recto Superior (O I) Recto Inferior (O S)	Oblicuo Inferior (R S) Oblicuo Superior (R I)
Arriba y a la izquierda Abajo y a la izquierda	Oblicuo Inferior (R S) Oblicuo Superior (R I)	Recto Superior (O I) Recto Inferior (O S)

Estos campos de acción se llaman también *posiciones diagnósticas musculares o de mirada*, ya que se utilizan para comprobar el funcionamiento de los músculos extraoculares. Existen seis posiciones diagnósticas musculares (*Tabla 8.2 y Figura 8.20*).

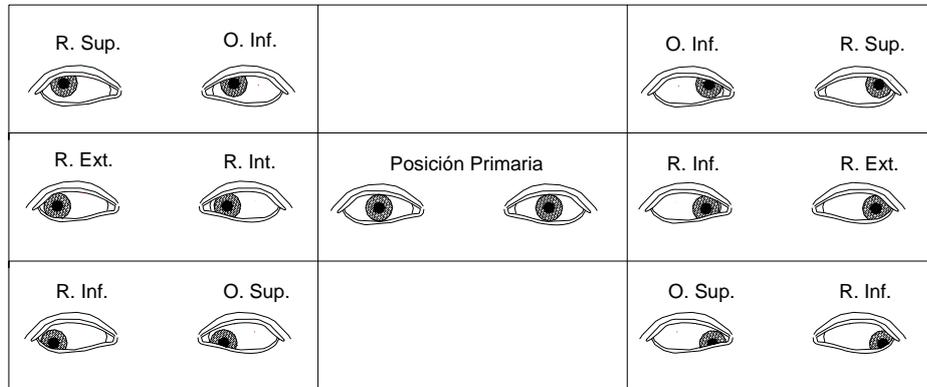


Figura 8.20. Posiciones diagnósticas musculares

En los músculos de acción vertical se podría, teóricamente, elegir entre el campo de acción vertical y el campo de acción torsional. Pero, en la evaluación clínica, solo se utiliza el campo de acción vertical porque el desplazamiento vertical es fácil de observar, mientras que el de torsión siempre es difícil y, a menudo incluso imposible. Por tal motivo, en clínica, la acción principal de los oblicuos es la acción vertical y no la de torsión, si bien esta última es más intensa desde el punto de vista fisiológico.

8.4.1 Músculos sinergistas y antagonistas

Cuando los ojos realizan movimientos en una determinada dirección, todos los músculos extraoculares participan en ese movimiento, unos contrayéndose y otros relajándose. Los músculos que se contraen para efectuar un determinado movimiento se llaman sinergistas entre sí. Los músculos que se relajan en ese movimiento son los antagonistas de los anteriores. Por ejemplo,

el recto inferior y el oblicuo superior son sinergistas en la depresión, pero son antagonistas con relación a los movimientos torsionales, pues el recto inferior es extorsionador y el oblicuo superior es intorsionador.

Esta nomenclatura se utiliza tanto para los músculos de un mismo ojo como para un ojo y otro.

8.4.2 Leyes de la inervación motora: ley de Sherrington y ley de Hering

Estas dos leyes de la inervación de los músculos, son necesarias para comprender bien la dinámica de la motilidad ocular, así como las alteraciones motoras de la visión binocular.

Siempre que los centros oculomotores envían una orden para aumentar la tonicidad de un músculo, envían otra para reducir la tonicidad de su antagonista. Con relación a la inervación de un solo ojo, la *Ley de Sherrington de la inervación recíproca* establece que cuando el músculo que actúa se estimula, su antagonista del mismo ojo se relaja. Es decir, cuando un ojo realiza un movimiento en una determinada dirección, los sinergistas se contraen y los antagonistas se relajan. Por ejemplo, si el recto externo derecho se contrae, su antagonista homolateral, el recto interno derecho, se relaja. El recto interno y externo de cualquiera de los dos ojos son obviamente antagonistas; el recto superior e inferior también se consideran como antagonistas, ya que sus principales acciones en la posición primaria se oponen la una a la otra, aunque ambos sean adductores. De forma similar los dos oblicuos son antagonistas.

La *Ley de Hering de la inervación igualitaria* o *de la correspondencia motora* se refiere a la inervación de los músculos de ambos ojos. Establece que en los movimientos oculares los sinergistas contralaterales reciben igual estimulación. Es decir, los influjos nerviosos enviados por los centros oculomotores a los músculos oculares para la realización de un movimiento en una determinada dirección son iguales para uno y otro ojo. Así, en un movimiento de versión binocular arriba y hacia la izquierda, el oblicuo inferior derecho y el recto superior izquierdo recibirían igual inervación ya que son sinergistas contralaterales. Sus antagonistas, el oblicuo superior derecho y el recto inferior izquierdo, en consecuencia se relajaran.

Si los músculos sinergistas son normales, responderán de la misma forma y los movimientos de los ojos serán estrictamente coordinados. En los casos patológicos se contraerán en forma desigual y, los movimientos oculares no serán coordinados.

9 VISIÓN BINOCULAR Y ESTEREOPSIS

La visión binocular permite fusionar en una percepción única las sensaciones recibidas por cada una de las retinas. En cada ojo se forma una imagen de parte de la misma escena y las dos imágenes se transmiten a la corteza cerebral. La percepción final es el resultado de la fusión de las dos representaciones visuales en los niveles corticales superiores.

9.1 CONDICIONES DE LA VISIÓN BINOCULAR

Para tener visión binocular es necesario que:

- a) Los campos visuales monoculares se superpongan en todas las direcciones de mirada.
- b) Los campos de fijación individuales se superpongan debido a los movimientos coordinados de los dos ojos.
- c) La transmisión neuronal desde los dos ojos alcance la misma área cerebral para que se produzca la fusión de las imágenes y sé de la coordinación de la percepción.

9.1.1 Campo visual común

El campo visual es la región del espacio que puede percibirse con la mirada fija en una determinada posición. Para que la visión binocular sea posible, las dos órbitas y la estructura de los ojos deben estar dispuestas para que los campos visuales se superpongan. Las órbitas están situadas frontalmente mirando hacia delante, aunque sus ejes divergen 45° . Sin embargo, los ojos están situados de manera que sus ejes visuales son aproximadamente paralelos (*Figura 9.1*).

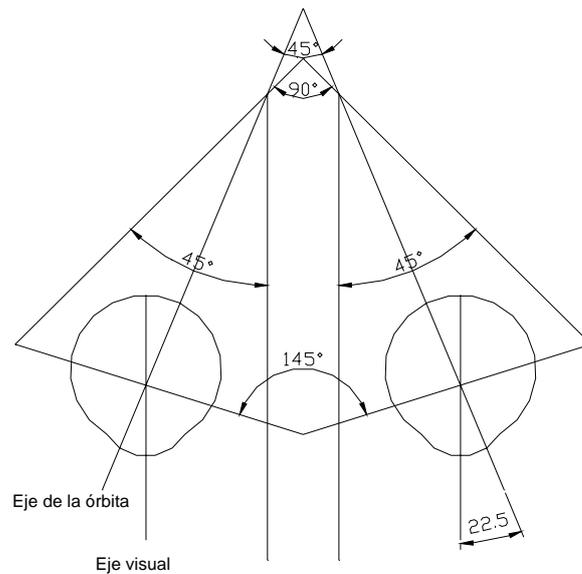


Figura 9.1. Esquema de las órbitas. Su orientación y relación entre sus ejes y sus paredes y los ejes visuales, con los ojos en posición primaria.

El campo monocular está limitado por los márgenes superior e inferior de la órbita, la nariz, y en el lado temporal por la proyección del borde de la retina. Por lo tanto, los límites monoculares abarcan como término medio de 90° a 100° en el meridiano temporal, 60° en los meridianos nasal y superior, y 75° en el meridiano inferior. El campo binocular es la región donde se superponen los dos campos monoculares, es decir, la porción del espacio que

contiene los objetos que pueden estimular simultáneamente ambas retinas cuando los ojos están inmóviles. Los límites son 60° a cada lado del punto de fijación, 70° hacia arriba y 90° hacia abajo.

9.1.2 *Campo de fijación y coordinación binocular de los movimientos oculares*

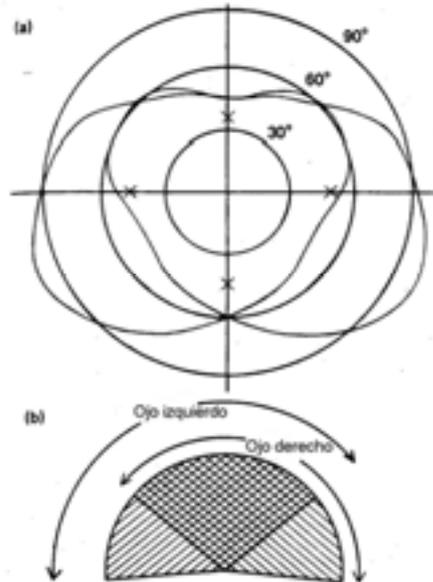


Figura 9.2. Registro de campos visuales monoculares. Las cruces en (a) indican los límites aproximados del campo de fijación binocular. (b) Campo horizontal visto desde arriba. El área doblemente rayada representa el campo de visión binocular.

El campo de fijación es aquella región del espacio que contiene todos los puntos en los que se puede fijar el ojo móvil, permaneciendo estática la cabeza. Los ojos no tienen un rango ilimitado de movimiento en sus órbitas, pero son

posibles movimientos de versión conjugados de los ojos alrededor de un rango de aproximadamente 45° desde la posición primaria. Los límites horizontal y vertical se indican con cruces en la *Figura 9.2*. Hay que tener en cuenta que para que los dos campos visuales monoculares se solapen en todas las direcciones de mirada es necesario que exista una coordinación binocular de los movimientos oculares.

Es importante distinguir entre los campos de visión y fijación. El campo de visión se refiere al ojo estacionario, mientras que el campo de fijación es el campo motor, el ángulo sólido en el que se pueden mover los ejes visuales. En la vida, el campo visual aumenta considerablemente por los movimientos tanto de la cabeza como del ojo, pero también se necesita una respuesta coordinada de estos movimientos de cabeza y ojo, los movimientos oculares por sí mismos raramente exceden de 20° .

9.1.3 Fusión

La transmisión neuronal desde los dos ojos debe alcanzar el mismo área cerebral para que se produzca la fusión de las imágenes. La semidecusación parcial de los nervios ópticos en el quiasma permite que el hemicampo visual derecho se represente en la corteza visual izquierda y el hemicampo visual izquierdo en la corteza visual derecha (*Figura 9.3*). Si todas las fibras cruzaran de lado, no se podría integrar la información para obtener una auténtica visión binocular a no ser que hubiera tractos de comunicación entre los dos hemisferios cerebrales.

La fusión es necesaria para tener una percepción única de las sensaciones recibidas por cada retina. Los ojos reciben imágenes ligeramente diferentes de objetos que están dentro del campo visual binocular debido a que están separados de 54 a 72 mm. Una simple superposición de estas dos imágenes daría lugar a una visión doble y a un sentido conflictivo de la dirección. Las dos sensaciones monoculares deben representarse en la corteza visual en una asociación correspondiente y el cerebro debe ser capaz de fusionarlas o integrarlas en una percepción binocular única.

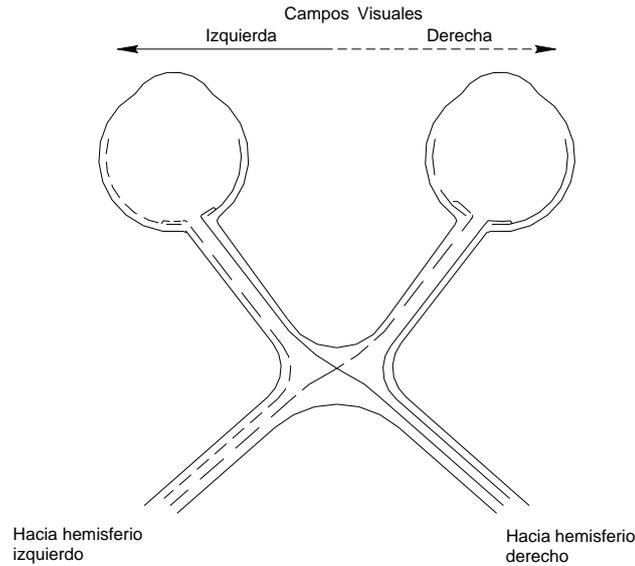


Figura 9.3. Representación simplificada de las vías de las fibras nerviosas hacia el cerebro.

9.2 PROYECCIÓN MONOCULAR

En el ojo normal la línea más importante de proyección es la definida por la posición del centro de la fovea. Para muchos propósitos el eje visual se puede considerar como el *eje de proyección* del ojo. En algunas condiciones anómalas la línea de proyección y el eje visual pueden diferir.

En la *Figura 9.4* está representado el eje de proyección de un ojo reducido como la línea que va desde la fovea M' a través del punto nodal N , que se toma como el centro monocular de proyección. Un objeto puntual A situado en algún lugar de la línea AN estimulará la retina en A' a la derecha de la fovea. Se dice que la imagen retiniana A' se proyecta hacia A . La dirección de proyección es constante para un punto determinado de la retina y cuando este punto retiniano se estimula, siempre da lugar a una sensación localizada en una dirección específica relativa de fijación.

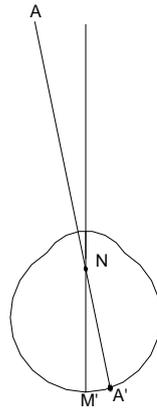


Figura 9.4. Proyección del punto imagen retiniano A' en el espacio a través del punto nodal de un ojo reducido.

Por lo tanto, la localización de un objeto en el espacio depende del área de retina que estimula. Cada área retiniana posee una *dirección visual* que significa que la misma localiza siempre en un determinado lugar del espacio subjetivo a los objetos que logran estimularla. No se concibe una percepción visual sin la localización de la misma.

La estimulación de la fovea provoca una localización en el eje del espacio subjetivo del sujeto. Por ello, se dice que tiene la *dirección visual principal*. Cuando los ojos están en posición primaria, el objeto que estimula a la fovea es percibido y localizado "derecho adelante".

Cuando se estimula una determinada área retiniana la localización de los objetos en el espacio no es absoluta, sino que depende de la distancia que separa al área estimulada de la fovea. Esto es fijo e independiente de la posición del globo en la órbita.

Cada área retiniana posee, además de su *dirección visual* un *valor motor* que induce un movimiento de fijación foveal para lograr que el objeto estímulo sea fijado por la fovea, cuya amplitud es constante para cada área, como lo es su dirección visual, y que al igual que ésta depende de la distancia existente entre la fovea y dicha área.

9.3 CORRESPONDENCIA RETINIANA

La visión única sólo es posible cuando existe una correspondencia entre retinas. Es decir, cada retina puede ser considerada como un calco de la otra y en ese caso a cada punto de una retina le corresponde un punto de la otra. Si se coloca la retina del ojo izquierdo sobre la retina del ojo derecho se cubren ambas fóveas y al mismo tiempo se superpone la mitad temporal de la retina izquierda sobre la porción nasal de la retina derecha y la mitad nasal de la izquierda sobre la temporal del ojo derecho.

Dos puntos retinianos serán correspondientes, si cuando se estimulan de forma separada parecen tener la misma dirección visual, es decir, se proyectan en la misma dirección y además inducen movimientos de rotación de igual magnitud. Por lo tanto, a cada punto retiniano con su dirección visual y valor motor determinado, le corresponde en el otro ojo, otro punto con igual localización e idéntico valor motor (*Figura 9.5*).

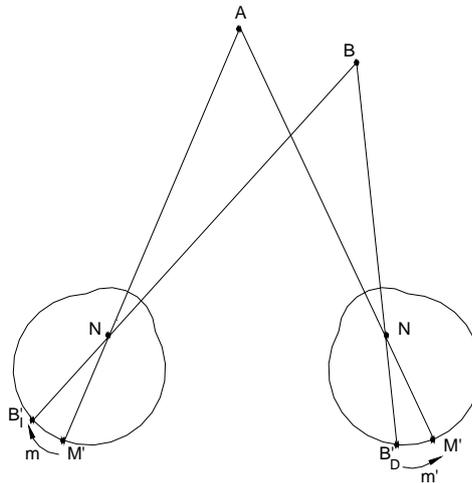


Figura 9.5. Los puntos retinianos B'_{I} y B'_{D} son correspondientes pues tienen direcciones visuales idénticas (B) e inducen movimientos de igual magnitud ($m = m'$).

Cuando los puntos retinianos correspondientes se estimulan en visión binocular, dan lugar a una sensación localizada subjetivamente en un punto único en el espacio. Las foveas, poseedoras de la dirección visual principal, son las áreas o puntos correspondientes de mayor importancia, pues su estimulación determina el eje alrededor del cual se ordena todo lo que abarca nuestro campo visual binocular. Todas las imágenes recibidas en otras áreas retinianas se integrarán a este orden y serán referidas en relación con la dirección visual de ambas foveas.

Por otra parte, la correspondencia no es un fenómeno retiniano sino cortical, puesto que la localización espacial, substrato de la correspondencia, es un elaborado mecanismo superior.

9.4 OJO CÍCLOPE

En visión binocular el espacio visual se percibe como desde un ojo único imaginario situado en medio de ambos ojos. Este órgano imaginario se conoce como ojo cíclope y permite estudiar la proyección de las imágenes en visión binocular, ya que es necesario un sistema único de direcciones visuales, cuyo marco de referencia está relacionado con la cabeza más que con los ojos.

Tomando como referencia la cabeza y no los ojos, se puede decir que el eje visual del ojo derecho y el del ojo izquierdo en visión binocular poseen una única dirección visual. Es decir, en el hipotético ojo cíclope sólo existe un eje visual y una única línea visual de mirada. Esto fue demostrado por Hering (1834-1918) mediante un experimento muy simple (*Figura 9.6*). Sí a medio metro de distancia de una ventana se mira con un ojo un punto concreto del cristal situado en línea con un objeto lejano, de tal manera que con el otro ojo se observa un objeto diferente a través del mismo punto de la ventana, cuando ambos ojos se fijan en el punto, los dos objetos lejanos ocuparán la misma dirección binocular. Esta observación demuestra que los centros de las dos foveas son un par de puntos correspondientes. No importa dónde estén situados los dos objetos en el espacio físico, pues aparecerán en la misma dirección visual si caen sobre líneas de mirada correspondientes.

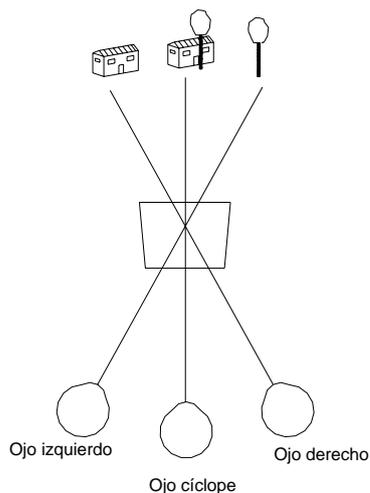


Figura 9.6. Demostración de Hering de la proyección binocular.

La fovea del ojo cíclope M_c está en la línea que va desde el punto de fijación a través del punto nodal. Así, cuando el punto de fijación está contenido en el plano medio, la línea primaria del ojo cíclope también está en ese plano. Cuando se estimula un punto de la retina del ojo izquierdo, es como si se estimulase un punto en la retina cíclope a la misma distancia y en la misma dirección respecto de su fovea. Lo mismo se aplica para un punto de la retina del ojo derecho. Si los puntos estimulados son puntos correspondientes, coincidirán cuando son transferidos al ojo cíclope y darán lugar a una percepción única a través del punto nodal cíclope (*Figura 9.7*).

Sí los puntos considerados de ambas retinas son dispares, no coincidirán cuando son transferidos al ojo cíclope. Dos percepciones separadas en diferentes direcciones dan lugar a una *diplopia fisiológica*. Se llama así debido a la aparente visión doble que permite ver un objeto en dos lugares a la vez, resultado de la geometría de la visión con los dos ojos y no tiene un origen patológico o debido a una disfunción.

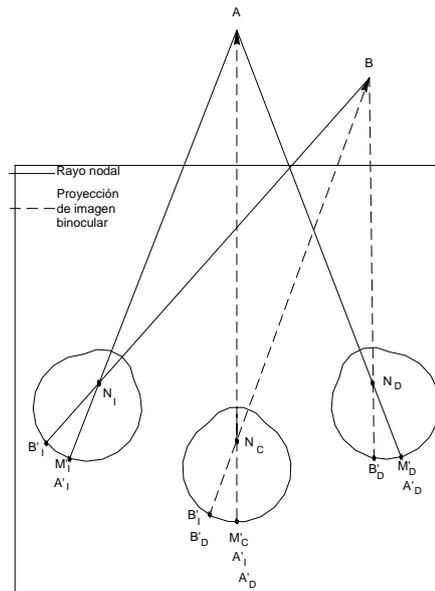


Figura 9.7. En visión binocular, el punto B se ve único ya que sus imágenes B_I y B_D caen en puntos correspondientes a la misma distancia de sus respectivas foveolas. Cuando son transferidos al ojo cíclope coincidirán y darán lugar a una percepción única a través del punto nodal cíclope.

9.5 DIPLOPIA FISIOLÓGICA

La imagen de un objeto estímulo situado más lejos o más cerca del punto de fijación no caerá sobre puntos correspondientes, y por lo tanto se verá doble aunque no seamos conscientes de ello en la vida diaria. A esto se le denomina *diplopi* fisiológica, que se percibe cuando se presta atención y puede ser homónima o heterónima.

9.5.1 Diplopia fisiológica homónima y heterónima

La **diplopia homónima** se produce para objetos más alejados que el punto de fijación. Por ejemplo, cuando se observa un lápiz a una distancia más lejana que el punto de fijación, éste se verá doble, de tal manera que la imagen localizada a la derecha del punto de fijación la verá el ojo derecho, y la de la izquierda el ojo izquierdo

La **diplopia heterónima** o cruzada se produce para objetos más próximos que el punto de fijación. En el caso de que se observe el lápiz a una distancia más cercana que un objeto lejano de fijación, el lápiz se verá doble de tal manera que la imagen localizada a la derecha del objeto de fijación la verá el ojo izquierdo y la de la izquierda el ojo derecho, es decir de forma cruzada.

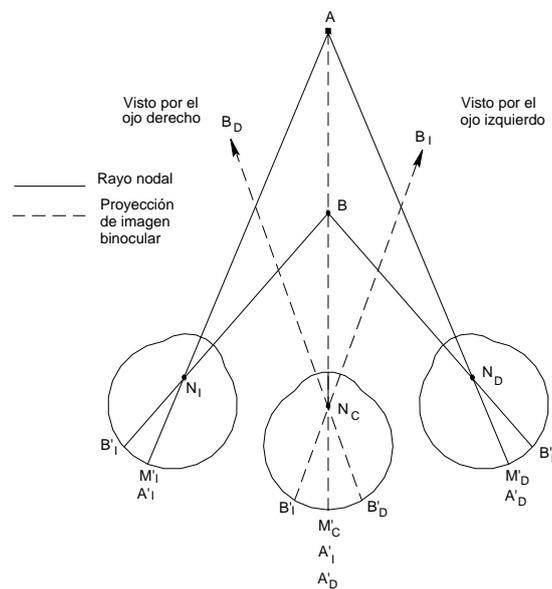


Figura 9.8. Diplopía fisiológica cruzada o heterónima del punto más cercano B cuando la fijación es el punto más lejano A. Proyección con el ojo cíclope.

El ojo cíclope es útil para explicar este fenómeno. En la *Figura 9.8* el objeto de fijación A está en el plano medio. Un punto B más próximo en el mismo plano, estimula los puntos retinianos B'_D y B'_I . Estos puntos son dispares debido a que están en lados opuestos a las fóveas respectivas y por lo tanto, cuando se transfieren al ojo cíclope, están en lados opuestos de la fóvea cíclope. En visión binocular, la proyección a través del punto nodal del ojo cíclope muestra que la imagen retiniana de B debida al ojo izquierdo se verá en la dirección $B'_I N_C$, esto es, a la derecha de la imagen debida al ojo derecho, proyectada en la dirección $B'_D N_C$. Por lo tanto, en este caso la diplopia es cruzada y la imagen localizada a la derecha del punto de fijación es vista por el ojo izquierdo y la de la izquierda por el ojo derecho.

En la *diplopia homónima o no cruzada* la imagen B_D localizada a la derecha del punto de fijación es vista por el ojo derecho y la imagen B_I localizada a la izquierda del punto de fijación es vista por el ojo izquierdo (*Figura 9.9*).

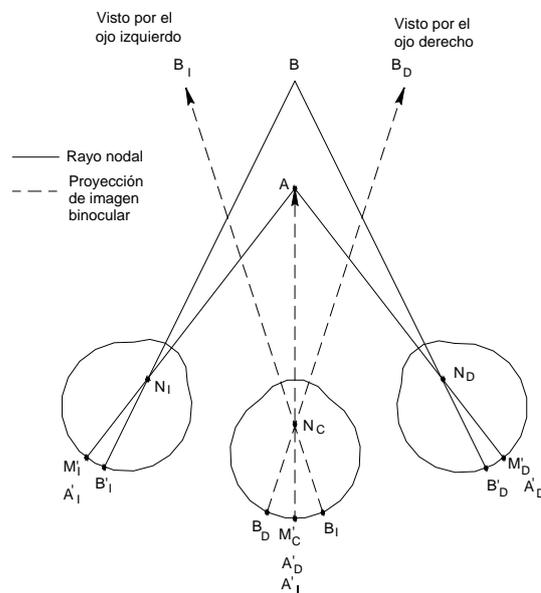


Figura 9.9. Diplopia fisiológica homónima del punto más lejano B cuando la fijación es el punto más cercano A . Modelo cíclope de proyección de la imagen binocular de los puntos objetos A y B .

La diplopia sirve para determinar de forma inconsciente la localización de los objetos en el espacio, es uno de los elementos de la percepción y de la visión de la profundidad y el relieve. Los objetos vistos inconscientemente en diplopia homónima parecen más lejanos que el punto de fijación y los objetos vistos inconscientemente en diplopia cruzada o heterónima parecen más próximos.

9.5.2 Diplopia patológica debida a un estrabismo

En el estrabismo los dos ejes visuales no se cruzan en el punto objeto de mirada. Se producirá diplopía, a no ser que la imagen del ojo desviado se suprima de manera que no se perciba. En ausencia de supresión, tal visión doble se llama diplopia patológica y se puede representar en el modelo cíclope.

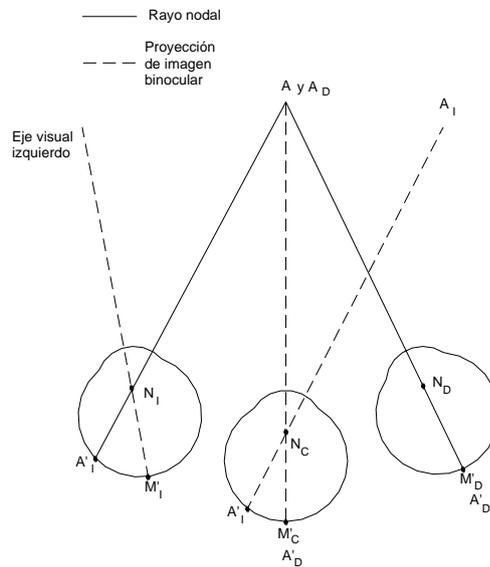


Figura 9.10. Diplopia patológica en un estrabismo divergente izquierdo.
Proyección de las imágenes retinianas a través del ojo cíclope.

En la *Figura 9.10* está representado un estrabismo divergente o exotropía del ojo izquierdo, en él que el ojo derecho fija el punto objeto A. La imagen de A cae en la retina temporal del ojo izquierdo y se proyecta a través del ojo cíclope al lado derecho del punto de fijación, mientras en el ojo derecho la imagen de A ($A'D$) se proyecta a través del ojo cíclope, para coincidir con el objeto A. La diplopia resultante es cruzada, estando la imagen percibida por el ojo izquierdo (A_I) a la derecha de aquella percibida por el ojo derecho (A_D).

9.6 LOCALIZACIÓN SUBJETIVA DE LOS OBJETOS

La estimulación retiniana por un objeto determina su localización espacial e induce un movimiento de fusión reflejo. Si se estimulan áreas correspondientes se obtiene una localización principalmente direccional, y si se estimulan áreas dispares (no correspondientes) la localización es principalmente en distancia o profundidad.

Cuando se estimulan áreas dispares se inducen movimientos oculares. Estos movimientos pueden ser o no ejecutados, pero al nivel cortical hay una cuantificación que permite localizar al objeto en distancia, por delante o por detrás del objeto fijado

Cuando los movimientos inducidos son de diferente sentido, pueden ser de convergencia si estimulan ambas retinas temporales y de divergencia si estimulan las hemirretinas nasales. Cuando los movimientos se inducen en el mismo sentido, pueden ser hacia la derecha o hacia la izquierda si se estimulan áreas dispares en hemirretinas izquierdas o derechas respectivamente. En todos estos casos los movimientos serán de diferente magnitud en cada ojo debido a que se estimulan áreas dispares donde las distancias a las fóveas serán diferentes y por lo tanto los valores motores también serán distintos.

La localización subjetiva del estímulo se deduce a partir de la relación existente entre la magnitud de los movimientos inducidos y la localización espacial de las áreas dispares estimuladas; por ejemplo, a la derecha y por delante, en el centro y por detrás. En este sentido, todo lo que induce movimiento de convergencia lleva implícita la noción de "cerca o por delante de"; todo lo que induce movimiento de divergencia da la noción de "lejos o por detrás de".

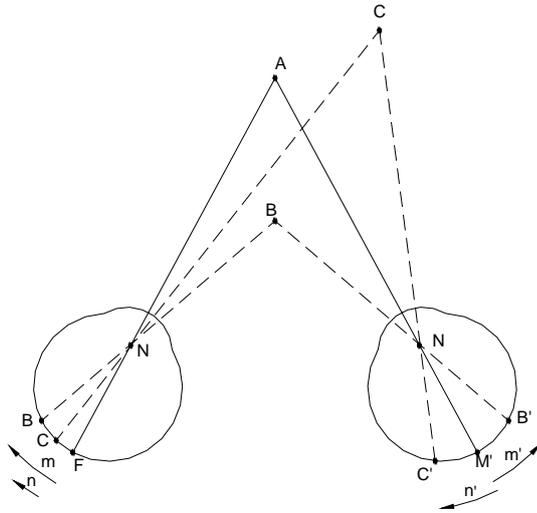


Figura 9.11. El objeto A es fijado por ambas fóveas, y es localizado derecho delante. El objeto B estimula ambas retinas temporales e induce movimientos de convergencia de igual magnitud ($m=m'$), por tanto es localizado por delante y en el medio con respecto a A. El objeto C estimula hemirretinas izquierdas que localizan en diplopia homónima y el valor motor resultante es hacia la derecha, por lo tanto es localizado a la derecha y por detrás del objeto A.

En la *Figura 9.11* un *objeto A* es fijado por ambas fóveas, por tanto, será localizado derecho delante, en el eje del espacio subjetivo. El *objeto B* estimula ambas retinas temporales e induce movimientos de convergencia que serán de igual magnitud ($m=m'$) en ambos ojos debido a que las áreas estimuladas están situadas a igual distancia de cada fóvea. La localización espacial, de acuerdo con las áreas estimuladas, dará una diplopia fisiológica cruzada que proporciona la noción de cerca o por delante de A. La evaluación de los movimientos inducidos, pero no realizados en este caso, ubicará el objeto en la línea media, pues sus valores motores son iguales, por lo que la resultante será cero motor. El *objeto C* estimula hemirretinas izquierdas que localizan en diplopia homónima y por tanto informa que C está más lejos o por detrás de A. Los movimientos inducidos son de igual sentido, hacia la derecha, pero de diferente magnitud. El valor motor resultante será hacia la derecha. El objeto C es localizado a la derecha y por detrás del objeto A.

9.7 HORÓPTERO. DETERMINACIÓN DEL HORÓPTERO LONGITUDINAL

Cuando se mantiene la fijación en un objeto hay en el espacio una serie de puntos que estimulan en ambos ojos puntos correspondientes, y por lo tanto los objetos o estímulos situados sobre los mismos se verán únicos.

En la *Figura 9.12* los ojos convergen para fijar el punto B que se ve único, y Q'_I y Q'_D son puntos correspondientes a la izquierda de cada fóvea. Como las líneas de proyección a través de los puntos nodales respectivos se cortan en Q, este es otro punto que se verá único con los ojos en la misma posición.

Para una fijación dada de los ojos, el lugar de todos los puntos del campo visual cuyas imágenes estimulan puntos correspondientes se conoce como *horóptero*. El horóptero espacial es una superficie curvada, como una cúpula aplanada imaginaria ante nuestros ojos.

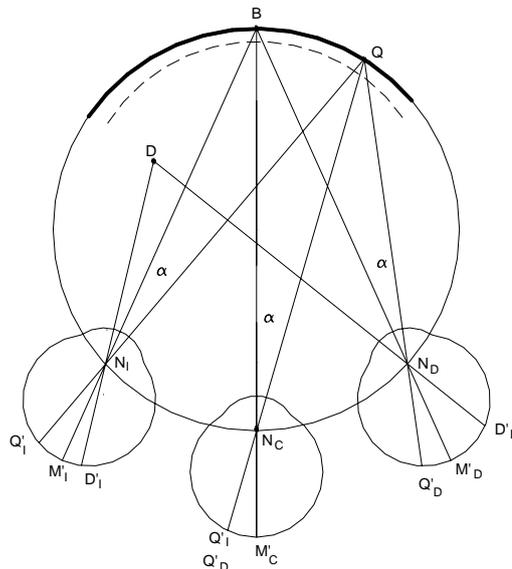


Figura 9.12. El horóptero longitudinal. Los subíndices I y D se refieren al ojo izquierdo y derecho, el C al ojo cíclope imaginario.

El punto Q se dice que está en el horóptero de la fijación del punto B. El *horóptero longitudinal* es la línea formada por la intersección del horóptero con el plano que contiene los centros de rotación de los ojos y el punto de fijación. En la *Figura 9.12* se muestra por la línea curva que pasa a través de B y Q.

Si se supone una simetría ocular perfecta, cada punto de un par correspondiente tiene la misma separación angular de la fovea, medida desde el punto nodal. Así los ángulos α en la *Figura 9.12* serán iguales y, el horóptero longitudinal formará parte del círculo que pasa a través del punto de fijación y de los puntos nodales de los ojos (el círculo de Vieth-Muller). Suponiendo que el horóptero longitudinal coincide con el círculo de Vieth Muller, el punto nodal N_c del ojo cíclope se situará sobre este círculo equidistante a los puntos nodales de los ojos reales.

El punto D situado fuera del horóptero forma sus imágenes sobre los puntos dispares D'_D y D'_I , que son puntos de las dos retinas que no son correspondientes. Aunque los puntos correspondientes no son necesariamente equidistantes de la fovea, la diferencia en el caso de D'_D y D'_I es tan grande que no podrían ser otra cosa que dispares. Por lo tanto, el objeto en D que los estimula simultáneamente se verá en diplopia.

Determinación del horóptero longitudinal: método nonius.

El sujeto se fija en un punto de fijación y observa una varilla vertical a un lado de él. En la *Figura 9.13* se muestra la disposición experimental y la visión del sujeto. Cada ojo solamente ve la mitad de la varilla gracias a un sistema de pantallas. La varilla se mueve más cerca o más lejos de los ojos hasta que las dos mitades se vean alineadas. El punto donde la varilla intercepta el plano de fijación es un punto sobre el horóptero longitudinal.

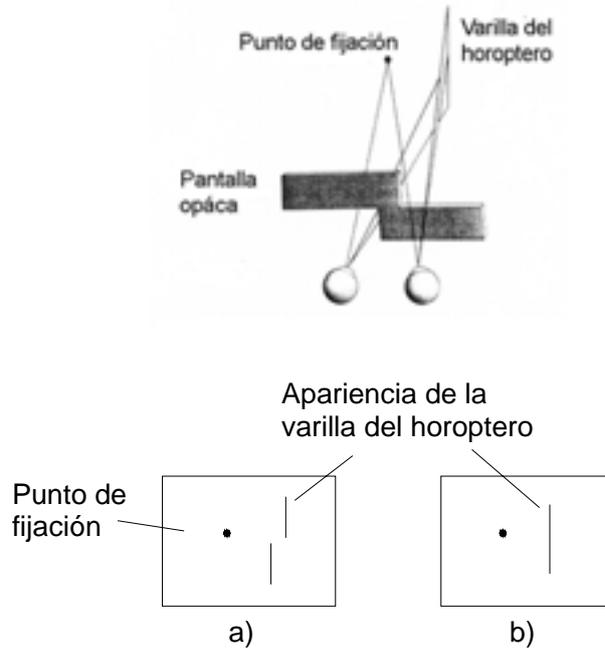


Figura 9.13. El método nonius de determinación del horóptero longitudinal y debajo la visión del sujeto a) la varilla no está sobre el horóptero, b) la varilla está sobre el horóptero.

Debido a que la agudeza visual disminuye aproximadamente a 20° de la fovea a 0,1, no es razonable determinar el horóptero más allá de ese punto. Para fijaciones inferiores a 2 metros, el horóptero longitudinal es cóncavo hacia al sujeto. Para una distancia igual a 2 metros el horóptero está aproximadamente en el plano fronto-paralelo, mientras que para distancias más lejanas es convexo para el observador. En la *Figura 9.14* se muestran las relaciones entre el círculo de Vieth-Müller, el horóptero longitudinal y el plano fronto-paralelo para una distancia de fijación inferior a 2 metros.

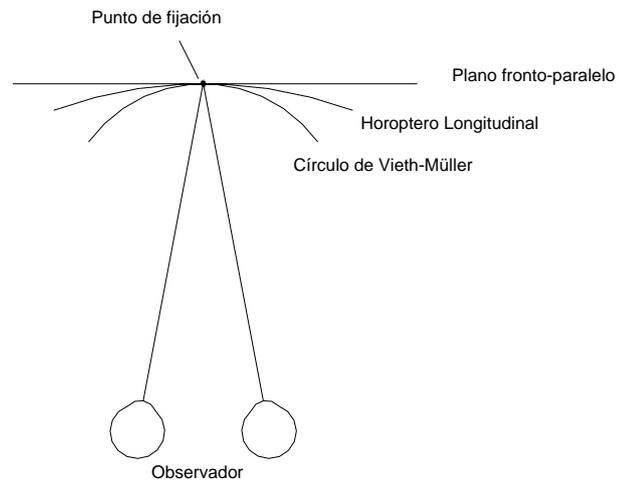


Figura 9.14. Relaciones entre el círculo de Vieth-Müller, el horóptero longitudinal y el plano fronto-paralelo para una distancia de fijación menor de 2 metros desde los ojos.

9.8 ÁREA FUSIONAL DE PANUM Y PUNTOS DISPARES

Los objetos situados por delante y por detrás del horóptero se ven dobles. Pero si se encuentran ubicados suficientemente cerca del horóptero puede ocurrir que, no obstante estimular puntos retinianos dispares, también se vean únicos. Esto es debido a que existe por delante y por detrás del horóptero una zona en el espacio dentro de la cual todo punto objeto se ve único (*Figura 9.15*). Esta zona, en la cual existe una tolerancia para la fusión sensorial entre áreas dispares se denomina *área de fusión sensorial o espacio fusional de Panum*

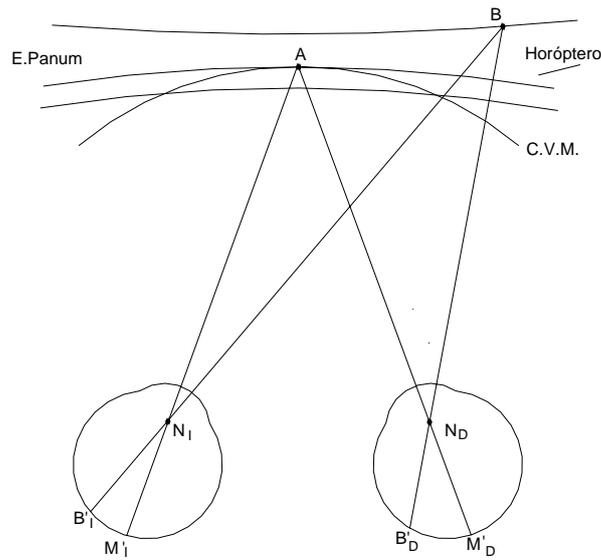


Figura 9.15. Espacio fusional de Panum. El objeto B no estimula puntos correspondientes pero se percibe único por estar dentro del área de fusión de Panum.

En 1858 Panum descubrió que la visión binocular no estaba limitada a una sola superficie (horóptero) sino que se extendía sobre un volumen en el espacio. Introdujo el concepto de áreas correspondientes, es decir, a un punto de la retina de un ojo no le corresponde un punto de la retina del otro ojo sino un área o conjunto de puntos conocido como *área de Panum*, de manera que si se estimula un punto de una retina existe una superficie de puntos en la otra retina cuya estimulación simultánea produce visión única. Así la visión binocular única no estaría limitada a la vecindad inmediata del horóptero sino que más bien se extiende en una pequeña distancia proximal y distal a él. Desde entonces la región de visión binocular única se conoce como área fusional de Panum y contiene al horóptero. Fuera de los límites del área de Panum los objetos se ven dobles.

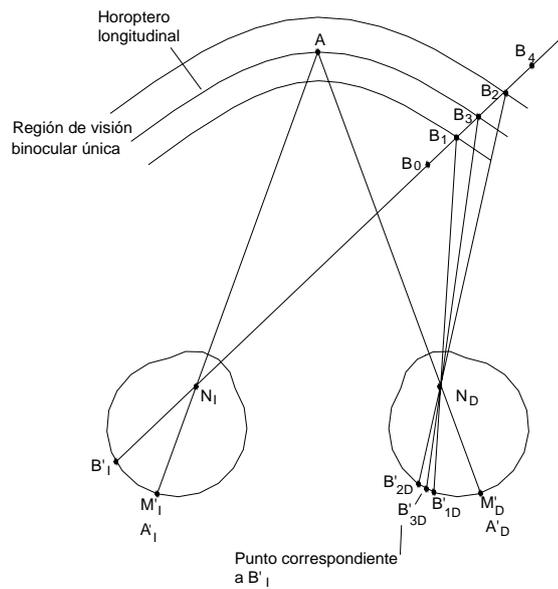


Figura 9.16. Representación de la extensión horizontal B'_{1D} B'_{2D} de un área fusional de Panum.

Los puntos repartidos sobre el área de Panum pueden asociarse al punto fijado por la retina del ojo opuesto, pero solamente uno de ellos será el punto correspondiente que tiene la misma dirección visual. Esto se ilustra en la *Figura 9.16* en la que el sujeto fija binocularmente el punto A mientras que el objeto B está en cualquier posición a lo largo de la dirección B'_1B . Este objeto B se percibe único entre B_1 y B_2 ya que las proyecciones de estos puntos a través del punto nodal del ojo derecho dan lugar a que B_1 y B_2 esté representado por la extensión horizontal B'_{1D} B'_{2D} sobre la retina derecha, que es la extensión horizontal del área retiniana del ojo derecho, conocida como área fusional de Panum que se corresponde con el punto B'_1 en el ojo izquierdo. Por lo tanto, cuando B forma una imagen B'_1 en el ojo izquierdo, y en cualquier punto entre B'_{1D} y B'_{2D} en el ojo derecho, se verá en visión binocular única.

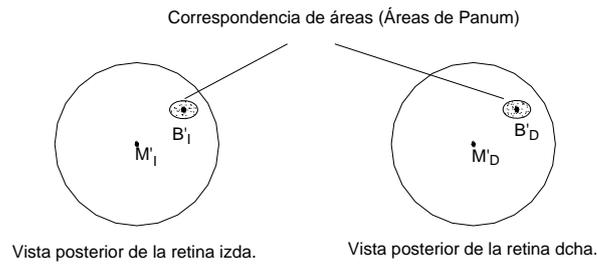


Figura 9.17. Ilustración de la relación entre áreas correspondientes

En la *Figura 9.17* se muestra como en lugar de una correspondencia punto a punto existe una correspondencia de áreas, tal que una pequeña área en una retina se corresponde con un área en la otra retina. Cerca de la fovea las áreas de Panum son aproximadamente elípticas con el eje mayor horizontal entre 13 y $23'$. En la periferia de la retina son más grandes, pueden subtender entre 1° y 5° . Las imágenes de objetos en estas áreas se fusionarán en una percepción binocular única.

La extensión del espacio fusional de Panum es variable y depende de la distancia a la que se encuentre el objeto fijado con relación al observador. Cuanto más lejano esté, mayor será la extensión del mismo. Este espacio siempre es más estrecho en su centro y más ancho en los extremos debido al aumento del tamaño de las áreas de Panum hacia la periferia de la retina.

9.9 DISPARIDAD DE FIJACIÓN

En las secciones precedentes se ha asumido que la fijación binocular significa que los ejes visuales se interceptan sobre el punto de fijación. Sin embargo, la existencia de áreas de fusión de Panum en la retina central implica que es posible que un ojo mantenga la fijación en un objeto mientras que el otro ojo se desvía una pequeña fracción de grado, hasta 15 minutos de arco y todavía se mantenga la visión binocular simple. Esta desviación en visión binocular se llama *disparidad de fijación* y no se debe considerar una desviación heterotrópica ya que es una desviación dentro de los límites fisiológicos de la fijación bifoveal normal.

En la *Figura 9.18* el eje visual del ojo izquierdo intercepta el punto de fijación A, pero no ocurre lo mismo con el eje visual del ojo derecho ya que está infraconvergiendo. Sin embargo, el objeto A todavía estimula el área fusional de Panum en la foveola derecha de tal manera que se percibe en visión binocular simple.

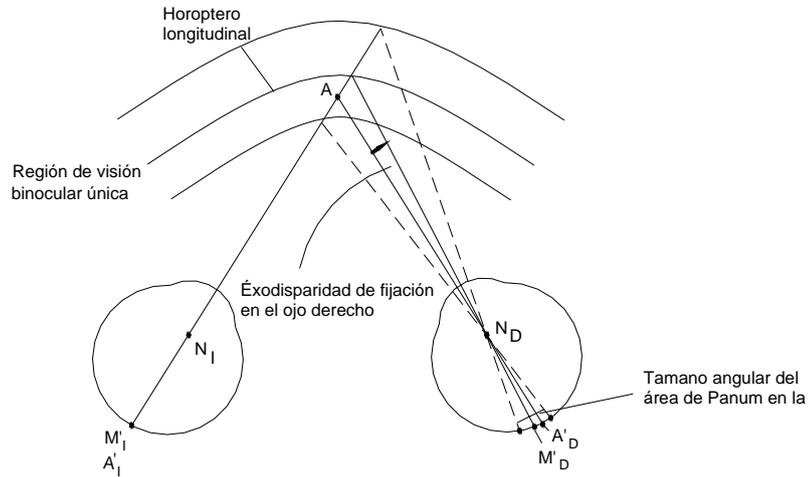


Figura 9.18. Exodisparidad de fijación en el ojo derecho.

En la *Figura 9.19* se ilustra el mismo ejemplo pero con el ojo derecho sobreconvergiendo. Estos casos se conocen como exo- y esodisparidad de fijación respectivamente.

La máxima cantidad de disparidad de fijación depende del diámetro del área de Panum en el centro de cada retina.

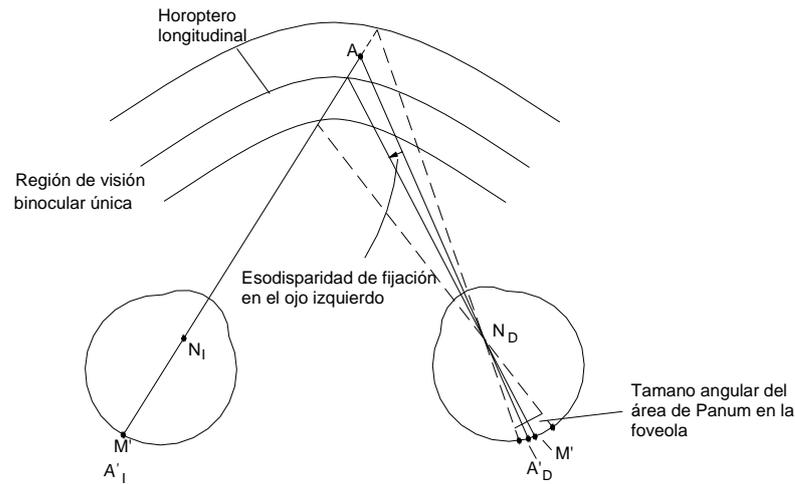


Figura 9.19. Esodisparidad de fijación en el ojo derecho

9.10 FUSIÓN, RIVALIDAD Y SUPRESIÓN

La *fusión sensorial* permite la percepción única de un estímulo a partir de las imágenes de las dos retinas. La fusión se inicia con un movimiento preciso de los ojos (reflejo de fusión) que hace que el objeto estimule áreas retinianas correspondientes, y se completa al nivel cortical, con el acto perceptivo propiamente dicho.

La fusión se basa en la correspondencia sensorial, pero no es sólo dependiente de ella. En condiciones normales de visión también existe fusión entre áreas retinianas con cierta disparidad en sus localizaciones espaciales y también suele haber fusión, aunque de menor jerarquía funcional, en desviaciones oculares de ángulo pequeño.

Para que la fusión se pueda llevar a cabo son necesarias dos condiciones:

a)- Se deben estimular áreas correspondientes o ligeramente dispares, pero con capacidad potencial para fusionar.

b)- Las sensaciones visuales recibidas en ambas retinas deben ser similares o por lo menos muy semejantes en forma y tamaño.

La existencia de alguna anomalía en uno de los ojos (opacidades en los medios transparentes, ametropías de cierta magnitud, defectos retinianos, etc) que por su intensidad no lleguen a anular la imagen recibida, pero sí determinen una estimulación diferente, atenuada o deformada, serán obstáculos para la fusión. Un paciente con miopía elevada en ambos ojos recibe imágenes imperfectas pero similares, y poseerá seguramente una fusión aceptable. Pero si el mismo padece una anisometropía miópica, con un ojo emétrope o muy poco miope y el otro con una miopía elevada, tendrá un serio obstáculo para fusionar por la disimilitud de las imágenes percibidas.

En determinadas circunstancias, con visión normal, se produce supresión y rivalidad.

La *supresión binocular* se define como la incapacidad para percibir, en parte o en la totalidad del campo visual de un ojo, objetos normalmente visibles, se debe a la utilización simultánea de ambos ojos y se atribuye a una inhibición cortical. La *Figura 9.20* muestra el efecto de supresión con contornos. Si un ojo observa una barra vertical negra y el otro ojo una barra horizontal negra, la imagen binocular debería ser una cruz. Sin embargo, al mirar esas dos imágenes monoculares en un estereoscopio la apariencia binocular es la de un cuadrado negro en el centro de la intersección de las dos barras, rodeado de "bordes" blancos donde se produce la supresión de las barras. La apariencia no es constante, la mitad de una barra puede suprimirse ocasionalmente. Donde las barras se solapan las imágenes son similares y estimulan la visión binocular, pero alrededor de esta imagen binocular están las bandas de supresión, zonas blancas donde las barras negras no se perciben.

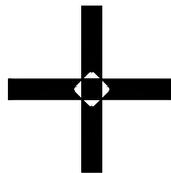


Figura 9.20. Supresión de contornos.

Por *rivalidad binocular* se entiende una alternancia o supresión intermitente en las imágenes de uno u otro ojo. Este efecto es fácil de observar cuando se presentan en un estereoscopio imágenes, para ser vistas con cada ojo por separado, que presentan diferencias en alguna característica, como la luminancia, el color o la orientación (*Figura 9.21*). Cuando la rivalidad se produce, el estímulo de un ojo suele ser dominante y se suprime por lo tanto, el estímulo del otro ojo. La dominancia puede fluctuar de un ojo a otro.

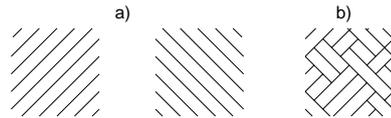


Figura 9.21: Rivalidad binocular. a) objetos presentados a cada ojo por separado, b) apariencia binocular.

Estos fenómenos adquieren particular importancia en la visión anómala, donde la supresión se hace más permanente.

9.11 PERCEPCIÓN BINOCULAR DE PROFUNDIDAD: VISIÓN ESTEREOSCÓPICA

La *visión estereoscópica* es la habilidad de juzgar la distancia relativa de los objetos al observador por medio de la visión binocular solamente. Esta habilidad depende de las pequeñas disparidades entre las imágenes retinianas de los dos ojos ya que debido a la distancia interpupilar ambas retinas reciben imágenes algo diferentes. Así, cuando se trata de un objeto grande, parte de las imágenes recibidas en ambos ojos serán iguales y estimularán puntos correspondientes permitiendo la fusión y la localización direccional. Otra parte del mismo objeto estimulará puntos dispares, pero comprendidos dentro del área de Panum, por tanto, también habrá fusión pero localización principalmente en distancia o profundidad. Finalmente parte del objeto sólo será visto monocularmente en razón de la distancia interpupilar.

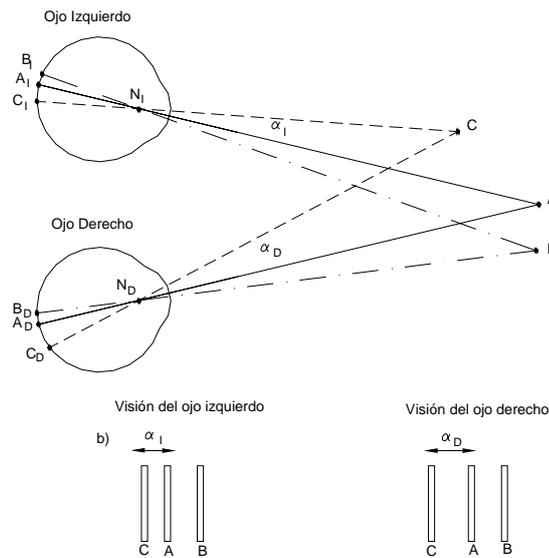


Figura 9.22. Percepción de la profundidad entre el objeto C y los objetos A y B. La imagen retiniana de C está a diferente distancia de las imágenes de A y B en el ojo derecho y en el ojo izquierdo.

En el caso de que las imágenes sean muy dispares la fusión es imposible y si por el contrario no hay disparidad, no hay percepción de la profundidad. Por lo tanto, la visión estereoscópica es la percepción de la profundidad en visión binocular a partir de imágenes ligeramente dispares, ya que cada retina recibe imágenes algo diferentes de la misma escena visual al estar separados los ojos por la distancia interpupilar (*Figura 9.22*). Asimismo la disparidad tolerable entre dos imágenes retinianas es mínima en el sentido vertical y mayor en el sentido horizontal.

9.11.1 Disparidad binocular

La disparidad de las imágenes retinianas basadas en la separación horizontal de ambos ojos proporciona los datos esenciales para las estimaciones de profundidad binocular y por lo tanto es la responsable del sentido de la estereopsis.

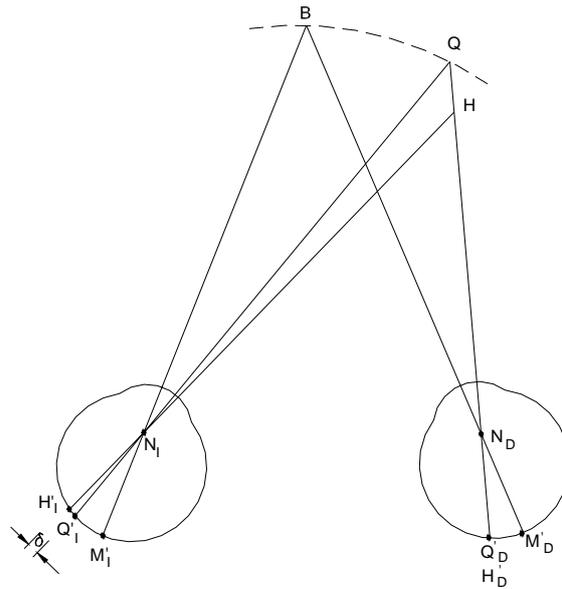


Figura 9.23. La disparidad retiniana δ asociada con la profundidad QH en el espacio objeto.

En la *Figura 9.23* ambos ojos se fijan en un objeto Q en el horizonte que pasa a través de B formándose las imágenes sobre los puntos correspondientes Q'_I y Q'_D . El punto H, en el límite del espacio fusional de Panum, da lugar a una imagen en H'_D coincidente con Q'_D y a la imagen H'_I en el límite del área de Panum centrada en Q'_I . Es esta pequeña disparidad, $Q'_I H'_I$, la que da origen a la estereopsis.

Como la separación angular de las imágenes de B y Q en ambas retinas es igual, tienen disparidad cero. Sin embargo, el punto H forma su imagen en puntos dispares dentro del área de Panum y por ello la separación angular de las imágenes Q y H en los dos ojos será diferente, esta diferencia angular se llama disparidad binocular de la imagen H. La cantidad de disparidad depende de lo lejos que esté el objeto del plano de fijación.

Artificialmente se puede crear una ilusión de relieve con el *estereoscopia*. Éste es un dispositivo que permite presentar delante de cada ojo de forma independiente dos imágenes ligeramente diferentes o dispares de la misma

escena. Estas parejas de imágenes se llaman *estereogramas* y se ven en tres dimensiones o relieve cuando se observan adecuadamente (*Figura 9.24*).

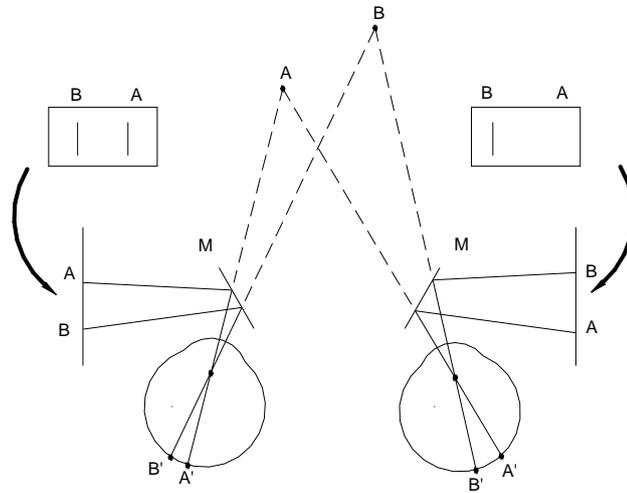


Figura 9.24. Esquema del estereoscopio y estereogramas cuya percepción binocular es la línea A por delante de la B.

En la *Figura 9.25* se muestra un ejemplo de estereogramas o pares estereoscópicos formado por unos círculos que se presentan a cada ojo de forma separada. Los círculos externos estimulan áreas correspondientes y se verán únicos, actuando como imagen guía, mientras que los círculos internos estimulan áreas dispares dentro del área de fusión de Panum y serán fusionados. Como el círculo interno está desplazado ligeramente hacia uno de los lados, la percepción simultánea de ambos círculos proporcionará una sensación de profundidad. Cuando los círculos internos están desplazados hacia dentro la estimulación de las hemirretinas temporales dará la información de "delante de", y por lo tanto, el círculo interno será percibido concéntrico al externo pero por delante de él. Sin embargo, cuando los círculos internos están desplazados hacia afuera la estimulación de las hemirretinas nasales dará la información de "detrás de", se verán concéntricos al círculo externo pero hacia atrás, en profundidad.

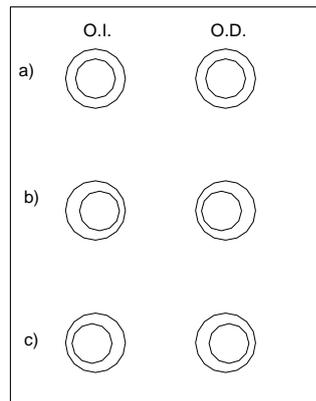


Figura 9.25. Pares estereoscópicos. a) Los círculos son concéntricos y por lo tanto no hay disparidad en las imágenes. b) El círculo interno parece más cercano que el externo debido a la disparidad de las imágenes. c) El círculo interno parece más lejano.

9.11.2 Agudeza estereoscópica

La agudeza estereoscópica es una medida de la *sensibilidad* de la visión estereoscópica que se determina a partir del *umbral de profundidad*. Siendo éste la mínima diferencia en profundidad que se puede discriminar entre dos objetos en el espacio, considerando la distancia sagital entre ambos. Cuanto más bajo es el umbral, mejor será la agudeza estereoscópica o estereoagudeza.

La *Figura 9.26* ilustra el caso más general en el que dos puntos objeto A y B no están alineados con ninguno de los ojos. La línea que une los puntos nodales N_I y N_D de ambos ojos es la base común de los dos triángulos que se establecen. Su longitud ($2a$) varía con el estado de convergencia, pero se puede aproximar a la distancia interpupilar (d_i). Esta línea determina con el punto A el ángulo α y con el punto B el ángulo β .

De acuerdo con el convenio de signos adoptado, la distancia s desde la línea base inter-nodal hasta el objeto B es negativa y la distancia Δs es positiva.

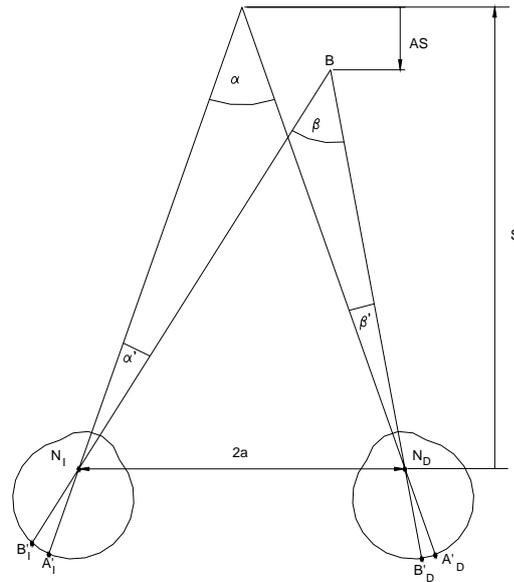


Figura 9.26. Diferencia en el paralaje binocular α y β respectivamente, del objeto A y B a diferentes distancias.

El pequeño ángulo α subtendido por la línea base en A es el paralaje binocular de A, mientras que el ángulo β es el paralaje binocular de B

$$\alpha = -\frac{2a}{s} \quad \beta = -\frac{2a}{s + \Delta s}$$

El ángulo está expresado en radianes con a y s en las mismas unidades lineales.

La *disparidad binocular o disparidad angular* es la diferencia entre los ángulos β' y α' , y es igual que la diferencia entre los ángulos β y α conocida como paralaje estereoscópico entre los puntos A y B o disparidad binocular relativa y que viene dada por:

$$\eta = \beta - \alpha = \frac{-2a \cdot \Delta s}{s \cdot (s + \Delta s)} = -\frac{2a \cdot \Delta s}{s^2 + s \cdot \Delta s} \text{ radianes}$$

Cuando la disparidad binocular se refiere al nivel umbral, el término $s \cdot \Delta s$ es muy pequeño en comparación con s^2 . Por lo tanto, la disparidad binocular medida en segundos de arco será igual a:

$$\eta = -\frac{2a \cdot \Delta s}{s^2} \cdot 206.265 \text{ segundos de arco}$$

La *agudeza estereoscópica* es el ángulo más pequeño de disparidad binocular relativa que se puede percibir y se expresa habitualmente en segundos de arco. Se puede determinar buscando la distancia más pequeña Δs que se puede percibir como diferencia en profundidad a una distancia objeto dada s .

Aunque desde el punto de vista clínico se consideran normales valores de agudeza estereoscópica alrededor de los 40 segundos de arco, un observador entrenado puede alcanzar agudezas de 5 segundos de arco, e incluso de 2" en condiciones favorables. Si η se toma como 5" y la distancia del punto nodal a la retina es de 16,7 mm, la disparidad δ mostrada en la *Figura 9.23* será tan pequeña como 0,0004 mm, mucho menor que el diámetro de un solo cono de la retina.

Realmente la agudeza estereoscópica se define como $\frac{1}{(\beta - \alpha)_{min}}$

Sin embargo, en la práctica clínica se cita el valor de $(\beta - \alpha)_{min}$ en segundos de arco y se le llama estereoagudeza por costumbre.

Por otra parte, la mínima profundidad detectable es,

$$\Delta s = \pm \frac{\eta \cdot s^2}{di \cdot 206} \text{ di (distancia interpupilar en mm)}$$

Por ejemplo, dado $\eta = 5$ segundos, $s = -1\text{m}$ y $d_i = 65\text{ mm}$, Δs es $\pm 3,7 \cdot 10^{-4}\text{m}$ o $\pm 0,37\text{ mm}$. Para otros valores de η , el valor de Δs se modificará proporcionalmente.

De la ecuación anterior se deduce que el umbral de profundidad lineal o mínima profundidad detectable Δs es directamente proporcional al cuadrado de la distancia de observación e inversamente proporcional a la distancia interpupilar. La *Figura 9.27* representa en escala logarítmica Δs en función de s para dos agudezas estereoscópicas diferentes, 5 y 20 segundos de arco, siendo la d_i 65 mm.

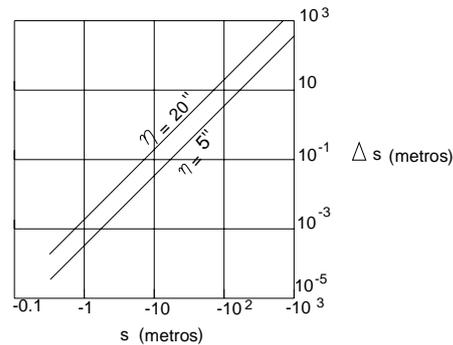


Figura 9.27. La mínima diferencia en profundidad perceptible Δs en función de la distancia objeto s para dos valores de agudeza estereoscópica. Ambas coordenadas están en escala logarítmica.

Se puede deducir que más allá de cierta distancia (algunas veces llamado recorrido estereoscópico), no se pueden percibir diferencias en profundidad a pesar de que estas sean grandes. Esta distancia es a la que la línea base subtiende el mismo ángulo η que la agudeza estereoscópica del sujeto. Para una distancia interpupilar de 65 mm, la distancia límite es alrededor de 2700 m cuando la agudeza estereoscópica es de 5 segundos de arco pero se reduce a aproximadamente 670 m cuando η tiene un valor de 20 segundos de arco.

9.11.3 Visión estereoscópica de puntos al azar

Bela Julesz (1964) introdujo el uso de *estereogramas de puntos aleatorios*, generados por ordenador, para estudiar diversas características de la estereopsis. Estos estereogramas son dos figuras casi idénticas formadas por puntos que el ordenador ha distribuido al azar. Un ejemplo de ellos se representa en la *Figura 9.28 a*. Las dos figuras que lo forman tienen idéntica textura salvo en una zona cuadrada de la parte central, que también es idéntica en ambas figuras pero que están ligeramente desplazadas una con respecto a la otra en sentido horizontal, es decir en esa zona existe disparidad entre las dos figuras. Las dos imágenes vistas estereoscópicamente se fusionan y se advierte entonces el cuadrado central flotando sobre el fondo. En este ejemplo, el cuadrado central del estereograma de la izquierda ha sido desplazado hacia la derecha y el del estereograma de la derecha hacia la izquierda, percibiéndose un acercamiento del cuadrado central respecto del fondo. Si los desplazamientos en cada una de las imágenes se hiciesen en sentido contrario, se observaría también el efecto contrario, o sea, un alejamiento del cuadrado central.

Estos estereogramas de puntos al azar son el origen de los autoestereogramas. En ellos las dos informaciones monoculares se encuentran simultáneamente sobre el mismo soporte, de forma intercalada. Esto requiere calcular adecuadamente la posición de cada uno de los puntos para emplearlo de forma diferente para el ojo derecho y para el ojo izquierdo (*Figura 9.29*). De este modo, cuando las tres figuras centrales (cuadrado, círculo, triángulo) situadas en el plano P son vistas por el ojo derecho se fusionan con las tres figuras de la izquierda del mismo plano, que se verán con el ojo izquierdo. Las mismas figuras centrales, al ser vistas por el ojo izquierdo, se fusionarán con las tres figuras que quedan a la derecha en el plano P, que serán vistas por el ojo derecho. El resultado es que estas figuras se distribuyen en el espacio de tal forma que generan la superficie S.

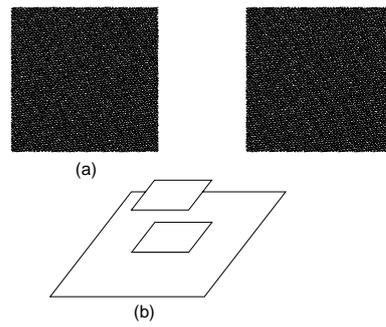


Figura 9.28. a) Los dos cuadrados parecen iguales cuando se ven monocularmente. b) Cuando se ven en un estereoscopio se observa un cuadrado central que se acerca al observador.

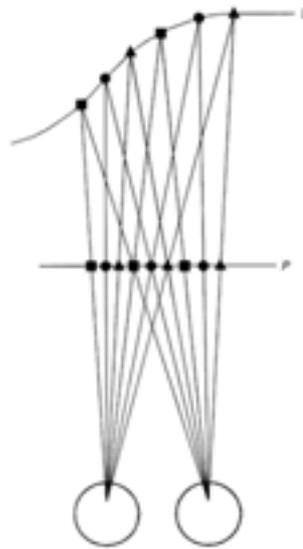


Figura 9.29. A partir de una adecuada distribución de los elementos situados sobre el plano P , se puede generar una superficie en tres dimensiones, S . Cada elemento del plano P sirve para estimular disparidades diferentes en cada ojo.

10 LA CONVERGENCIA

10.1 CONCEPTO DE CONVERGENCIA

El término convergencia tiene dos significados diferentes, uno describe la posición relativa de los ejes visuales cuando se encuentran en un punto próximo dado de visión y el otro se refiere a los movimientos relativos de los ejes visuales cuando la fijación cambia desde un punto más lejano a un punto más próximo (*Figura 10.1 a*).

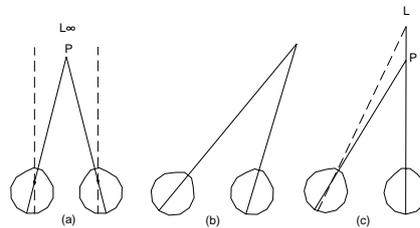


Figura 10.1. Convergencia: a) convergencia desde un objeto lejano L hasta un objeto próximo P ; b) fijación en un punto alejado del plano medio; c) convergencia asimétrica.

Si los objetos lejanos y próximos están ambos en el plano medio, ambos ojos adducen en la misma proporción en la convergencia y abducen en la divergencia. Cuando la fijación es en un objeto próximo situado en la derecha (*Figura 10.1 b*), el ojo derecho abduce (gira hacia afuera) y el ojo izquierdo adduce (gira hacia dentro). Un caso especial ocurre cuando la fijación cambia de un punto lejano a un punto próximo, ambos situados sobre el eje visual de un ojo (*Figura 10.1 c*), ya que solamente necesitará rotar el otro ojo para cambiar la fijación.

La convergencia puede iniciarse de dos formas, voluntaria e involuntariamente. La convergencia voluntaria es la rotación volitiva nasal de los dos ojos en ausencia de estímulo físico. No existe en todas las personas pero puede adquirirse cierto grado de convergencia mediante el entrenamiento.

La convergencia involuntaria es un reflejo dirigido a obtener visión binocular próxima simple. En circunstancias normales es un movimiento de fusión realizado en sinergia con la acomodación. Este tipo de convergencia será el que estudiaremos, pero es importante señalar que si la convergencia voluntaria está bien desarrollada, la convergencia refleja actúa por lo general más eficaz y automáticamente.

La convergencia de los ejes visuales de ambos ojos sobre el objeto fijado permite la fusión binocular de las imágenes retinianas. Si un objeto se acerca al sujeto, las imágenes se desplazan de cada fovea en dirección temporal. Esta disparidad temporal de las dos imágenes en relación con las dos foveas, proporciona el estímulo para la convergencia.

Por lo tanto, la convergencia juega un papel indispensable en el mantenimiento de la visión binocular simple para todas las distancias más próximas que el infinito, por ello debe ser exacta en minutos de arco para evitar la diplopía. Sin embargo, la acomodación no necesita ser tan exacta ya que la profundidad de foco del ojo todavía da al observador una percepción aguda.

10.2 PUNTO PRÓXIMO DE CONVERGENCIA

Cuando los ojos están en reposo y mirando de frente un objeto lejano (posición primaria de mirada), los ejes visuales son paralelos y no se realiza esfuerzo de acomodación. Pero para ver claramente de cerca, además de acomodar los ojos, los ejes visuales han de girar hacia dentro de manera que ambos se dirijan hacia el objeto. Si el objeto se aproxima paulatinamente a los ojos, éstos convergen cada vez más sobre él, hasta llegar a un punto en el que se alcanza el límite de convergencia a partir del cual la imagen se ve doble, y al ceder el esfuerzo mantenido, los ejes se desvían ligeramente hacia afuera.

El *punto próximo de convergencia* es el punto más cercano para el que es posible mantener la convergencia. Normalmente se puede determinar clínicamente haciendo observar al sujeto una línea negra dibujada en una tarjeta blanca que se mueve progresivamente hacia los ojos hasta que la ve doble.

El *punto remoto de convergencia* se refiere a la posición relativa de los ojos cuando están completamente en reposo. En general, los ejes visual y óptico no coinciden, sino que en la posición de reposo existe generalmente una pequeña desviación de los ejes ópticos hacia afuera. El punto remoto, en vez de estar en el infinito, está situado "más allá del infinito" y puede encontrarse prolongado los ejes hacia atrás de forma que se encuentran detrás del ojo. Por otra parte, en los casos en que exista una convergencia aparente de los ojos en la posición de reposo, el punto remoto se situará a una distancia finita.

La distancia entre el punto remoto y el punto próximo se llama recorrido de convergencia, y la diferencia de poder convergente necesaria para mantener a los ojos en ambas posiciones se denomina amplitud de convergencia.

10.3 CÁLCULO DEL ÁNGULO DE CONVERGENCIA. UNIDADES

Para fijar binocularmente el punto B de la *Figura 10.2* situado en el plano medio, los ojos tienen que rotar. La convergencia de cada ojo es el ángulo que éste ha rotado desde su dirección primaria, (α_d para el ojo derecho y α_i para el ojo izquierdo)

La línea que une los dos centros de rotación Z_d y Z_i se llama línea base interocular y su longitud la distancia interocular, que es aproximadamente la misma que la distancia interpupilar para visión lejana (d_p).

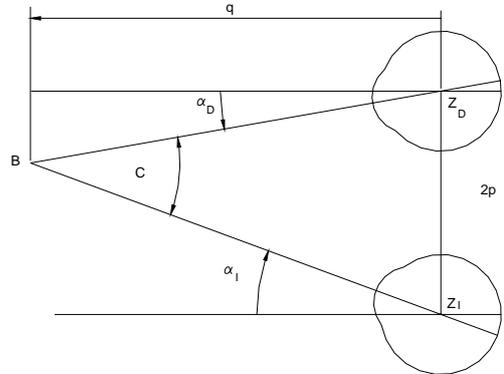


Figura 10.2. El ángulo total de convergencia C .

El ángulo total de convergencia C es el ángulo determinado por los ejes visuales cuando se dirigen al punto de fijación y es la suma algebraica de las rotaciones individuales del ojo derecho y del ojo izquierdo, medidas en el plano que contiene el punto de fijación y los centros de rotación del ojo. Si $2p$ es la distancia interocular, q la distancia del punto de fijación desde la línea base y $Q = \frac{1}{q}$ (q en metros), entonces:

$$C = \arctan \left(-\frac{2p}{q} \right), \quad p \text{ y } q \text{ en metros.}$$

$$C = \arctan (-2pQ)$$

Nagel propuso un método práctico de medir la convergencia cuya unidad se llama ángulo métrico (a.m.) que representa la cantidad de convergencia necesaria para que los ejes visuales se encuentren a la distancia de un metro

(Figura 10.3). Si convergen sobre un objeto situado a un metro en la línea medida entre los dos ojos, el ángulo que forma la línea que une el objeto y el centro de rotación de cada ojo con la línea media es un ángulo métrico.

El desplazamiento angular variara necesariamente con la distancia entre ambos ojos. Con una distancia interpupilar de 60 mm; un ángulo métrico es de unos 2°. Si el objeto esta a 2 m; el ángulo será la mitad (0,5 a.m.), y si se acerca a medio metro será el doble (2 a.m.). En general la amplitud normal de convergencia es de 10,5 a.m., pero puede ser mucho mayor, de hasta 15 ó 17 a.m.

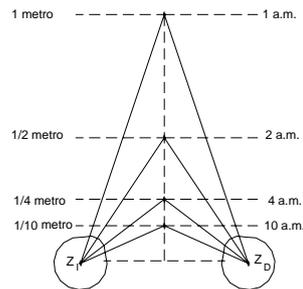


Figura 10.3. Notación de ángulos métricos.

El valor de la convergencia expresado en ángulos métricos está representado por la *inversa del punto de fijación a la línea base (1/q)*, es decir, la *distancia dióptrica Q*.

$$C \text{ (a.m.)} = -Q = /Q/$$

La ventaja de usar el ángulo métrico como unidad de medida es que la cantidad de acomodación expresada en dioptrías es la misma que la cantidad de convergencia expresada en ángulos métricos. Por ejemplo, si un sujeto ortofórico fija un punto situado a 0,5 m tendrá que acomodar 2 D y converger (1/0,5) 2 a.m. Para leer a 25 cm se necesitarán 4 D de acomodación y 4 a.m. de convergencia.

El valor de la convergencia se mide también en *dioptrías prismáticas*, preferidas por los optometristas y que tienen la ventaja de tener en cuenta la distancia interpupilar o mejor dicho la distancia entre los centros de rotación de los ojos.

Un ángulo de una dioptría prismática es el que produce un desplazamiento de un cm a la distancia de un metro.

Para un desplazamiento de y cm a x metros, el ángulo de desviación α en dioptrías prismáticas es

$$\alpha = \frac{y}{x}$$

Se debe tener en cuenta que la dioptría prismática es realmente cm/m . Sí y cm se divide por 100, entonces $y/100$ está expresado en metros y por lo tanto

$$\frac{\frac{y}{100}}{x} = \tan \alpha$$

$$\frac{y(cm)}{x(m)} = \alpha = 100 \cdot \tan \alpha$$

$$\alpha(\Delta) = 100 \cdot \left(\frac{y}{x} \right) \quad (x \text{ e } y \text{ en metros})$$

El ángulo en dioptrías prismáticas es 100 veces la tangente del ángulo en grados. Inversamente, para pasar desde dioptrías hasta grados

$$\alpha = \arctan \left(\frac{\alpha}{100} \right)$$

La convergencia monocular en dioptrías prismáticas es igual a:

$$\alpha = -\frac{1}{2} \cdot 2p \cdot \left(\frac{1}{q}\right)$$

$$C (\Delta) = (\alpha_d + \alpha_i) = -2pQ, \quad \text{donde } p \text{ viene expresado en cm;}$$

También se puede escribir que:

$$C (\Delta) = -Q \cdot d_p \quad d_p \text{ en cm.}$$

Ejemplo:

¿Cuál será la convergencia en dioptrías prismáticas necesaria para fijar un objeto situado a -25cm?

La distancia interpupilar es de 60 mm.

$$C = -Q \cdot d_p = -(1/0,25) \times 6 = 4 \times 6 = 24 \Delta$$

Se puede pasar de la medida de convergencia en ángulos métricos a la medida en dioptrías prismáticas mediante la siguiente formula:

$$C (\Delta) = C (\text{a.m.}) \times d_p (\text{cm.})$$

10.4 CONVERGENCIA, ACOMODACIÓN Y ERROR REFRACTIVO

La relación entre convergencia y acomodación varía con la edad y con las ametropías. Está afectada por cualquier ametropía sin compensar y también por la compensación que se use.

10.4.1 Emetropía

La *Figura 10.4* ilustra la demanda teórica de acomodación y convergencia conforme el objeto de mirada se aproxima al ojo emétrepe. La convergencia total que se requiere está representada en dioptrías prismáticas para tres distancias interpupilares distintas. En la parte superior del gráfico hay una escala para leer directamente la acomodación necesaria según la distancia objeto; ésta acomodación es numéricamente la misma que la convergencia en ángulos métricos.

Mientras que la convergencia total necesaria es $C (\Delta) = -2pQ$ (p en cm); la acomodación es igual a $-Q$. Por lo tanto, la relación convergencia acomodación en la emetropía viene dada por:

$$C/A = 2p = d_p \text{ (en cm)}$$

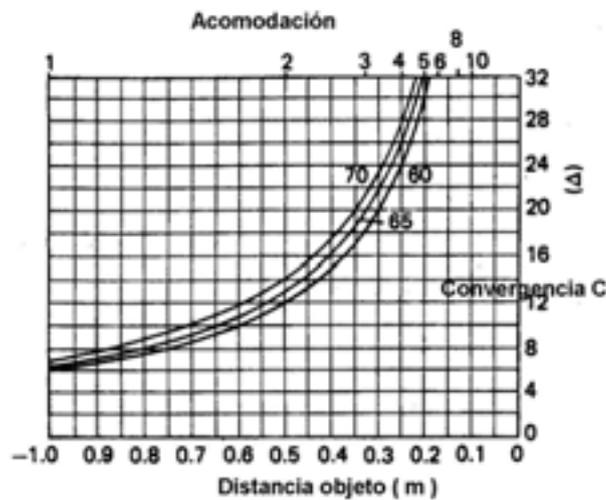


Figura 10.4. El ángulo total de convergencia C en dioptrías prismáticas, en función de la distancia objeto para d_p de 60, 65 y 70 mm.

10.4.2 Ametrópía sin compensar

Si el valor de la ametropía es R , la acomodación necesaria en visión próxima a la distancia dióptrica Q es:

$$A = R - Q$$

mientras que la convergencia no varía siendo:

$$C = -2pQ$$

Por lo tanto,

$$C/A = 2p \left(\frac{Q}{Q - R} \right)$$

Esta relación tiene muchos valores posibles. Por ejemplo, el hipermetrope necesitará acomodar más que el emétrope mientras que converge en la misma cantidad. Sin embargo, si no se tiene en cuenta la acomodación habitualmente necesaria para corregir el defecto refractivo en visión lejana y sólo se considera la acomodación adicional necesaria en visión próxima, la relación C/A es la misma que la del emétrope. En la miopía la situación es diferente por que necesita acomodar menos que un emétrope.: un miope de 3,00 D enfoca objetos a 1/3 m y no necesita acomodar para esta distancia o cualquiera superior.

En consecuencia en las ametropías no compensadas es necesaria la disociación de ambas funciones. Por ejemplo, para ver un objeto situado a 25 cm el emétrope necesita igual cantidad de convergencia que de acomodación, es decir ejerce 4 D de acomodación y 4 a.m. de convergencia, mientras que un hipermetrope de 2 D tiene que emplear 6 D de acomodación y 4 a.m. de convergencia y un miope de 2 D utiliza 2 dioptías de acomodación y 4 a.m. de convergencia.

Por lo tanto, el hipermetrope tiene que emplear una acomodación superior a su convergencia y el miope una convergencia superior a su acomodación.

10.4.3 Emétrope con compensación de cerca

Si las lentes oftálmicas están centradas ópticamente para una distancia de trabajo dada, la convergencia necesaria no está afectada. Sin embargo, la demanda de acomodación está reducida por la adición de lectura prescrita.

10.4.4 Ametropía compensada: convergencia a través de la lente oftálmica

Cuando se llevan gafas para visión lejana de forma constante que se utilizan en visión próxima, la acomodación ocular necesaria ya se ha visto que difiere de la acomodación oftálmica, mientras que la cantidad de convergencia necesaria para mirar un punto objeto en la línea media depende no sólo de la distancia del objeto al ojo sino también de la potencia y distancia de la lente oftálmica al ojo.

Ejemplo:

Un miope bilateral con una d_p de 66 mm se compensa con lentes de $-6,00$ D a 14 mm del punto principal del ojo. Calcular la convergencia y acomodación necesaria cuando miran un objeto en el plano medio a una distancia de 400 mm del plano de la lente. Asumir que los centros de rotación de los ojos están a 26 mm de este plano.

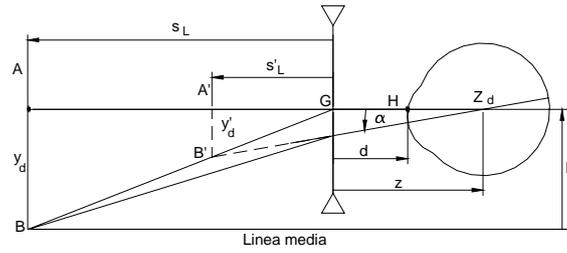


Figura 10.5. Acomodación y convergencia en el miope compensado mediante una lente oftálmica delgada.

De la *Figura 10.5* en visión lejana:

$$F_L = -6,00 \text{ D}$$

$$f' = -166,67 \text{ mm}$$

$$r = f' - d = -166,67 - 14 = -180,67 \text{ mm}$$

$$R = -5,53 \text{ D}$$

En visión próxima:

$$S_L = -2,50 \text{ D}$$

$$S'_L = S_L + F_L = -2,5 - 6,00 = -8,50 \text{ D}$$

$$s'_L = -117,65 \text{ mm}$$

$$s = s'_L - d = -117,65 - 14 = -131,65 \text{ mm}$$

$$S = -7,60 \text{ D}$$

$$\text{Acomodación ocular} = R - S = -5,53 + 7,60 = + 2,07 \text{ D}$$

El ojo derecho fija B'_d , la imagen de B formada por la lente derecha. Si la distancia LB y $L'B'_d$ se denominan por y_d e y'_d respectivamente, entonces

$$y'_d = y_d \frac{S_L}{S'_L} = 33 \cdot \frac{-2,50}{-8,50} = 9,71 \text{ mm}$$

Y la semi-convergencia, ángulo α (en Δ) se calcula de:

$$\alpha = 100 \cdot \frac{y'_d}{L'Z_d} = 100 \cdot \frac{y'_d}{s'_L + z} = 100 \cdot \frac{9,71}{117,65 + 26} = 6,76 \Delta$$

$$C = 13,52 \Delta$$

$$C/A = 13,52/2,07 = 6,53 \Delta/\text{D}$$

10.4.5 Ametrópía compensada con lentes de contacto

Utilizando los mismos datos necesarios que en el ejemplo anterior, calcular la convergencia y acomodación necesaria con la compensación de lentes de contacto (*Figura 10.6*).

Ignorando pequeñísimas diferencias, se puede tomar como distancia de fijación del objeto B desde la lente de contacto - 414 mm, la misma que HL en el ejemplo anterior. La acomodación ocular es por lo tanto $1000/414$ o 2,42 D. La convergencia (en Δ) es la misma que para el ojo emétrope, es decir:

$$C = -2pQ \quad (p \text{ en cm})$$

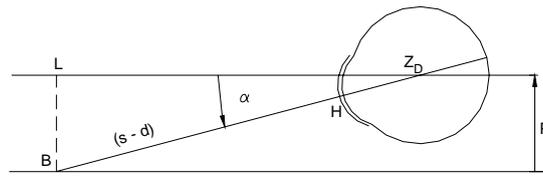


Figura 10.6. Acomodación y convergencia en el miope compensado mediante una lente de contacto.

en este caso

$$q = s_L - z = -426 \text{ mm}$$

$$Q = -2,35 \text{ D}$$

$$\text{y } C = -2,35 \cdot 6,6 = 15,51 \Delta$$

$$C/A = 15,51/2,42 = 6,41 \Delta/\text{D}$$

Por lo tanto, aunque el usuario de lentes de contacto en este ejemplo tiene que converger más y acomodar más que el usuario de gafas, la relación de las dos funciones es virtualmente la misma para ambos.

Los valores típicos de z (desde la lente oftálmica hasta el centro de rotación del ojo) van desde 25 a 30 mm, mientras que los valores típicos de d oscilan entre 12 y 15 mm.

En general el mayor cambio en la relación convergencia/acomodación ocurre cuando se lleva la primera compensación. Después, los cambios en la compensación prácticamente no influyen hasta que la acomodación empieza a disminuir en la presbicia.

10.5 RELACIONES ENTRE CONVERGENCIA Y ACOMODACIÓN

En la visión binocular normal, la acomodación y convergencia trabajan juntas, siendo la relación entre ellas estrecha, pero también es bastante elástica y cualquiera de las dos puede ejercerse por separado. Esta relación varía con la edad y con las ametropías no compensadas, siendo necesaria la disociación de ambas funciones. Con la edad la amplitud de acomodación disminuye, mientras que la convergencia permanece estable.

La cantidad de disociación entre acomodación y convergencia no es ilimitada, puede aumentarse por la práctica y varía de un individuo a otro, e incluso en el mismo individuo en momentos distintos. El esfuerzo de disociación puede no producir trastornos o puede originar molestias considerables. Además en ocasiones puede ser imposible alcanzar el grado necesario de disociación y a la larga un ojo puede desviarse y aparece el estrabismo, debido a que una imagen clara es una ventaja más inmediata que mantener la visión binocular.

10.5.1 Convergencia acomodativa, próxima y fusional

Cuando ambos ojos se fijan en un punto se dice que están en *posición activa*, determinada por los reflejos de fusión, fijación y postural. Las posiciones activas o funcionales son aquellas en las que los ejes de fijación se interceptan en la posición de mirada y ocurre cuando los ojos están paralelos en visión lejana y convergiendo en visión próxima. Sin embargo, cuando ambos ojos están tapados adoptan una posición conocida como *posición fisiológica de reposo*, que en general es algo divergente.

Si un ojo se fija en un punto y se ocluye el otro, el ojo ocluido adopta una posición pasiva o disociada debido a que se ha eliminado el reflejo de fusión (*Figura 10.7*). En la ausencia del reflejo de fusión se dice que los ojos están *disociados*. Por eso, las posiciones disociadas o pasivas son las posiciones adoptadas por los ojos cuando los reflejos de fijación y postural están activos pero se evita la fusión. Cuando el objeto de fijación está distante y en la línea media, la posición pasiva o disociada se conoce como *posición de reposo funcional*. El movimiento que los ojos hacen para ir desde la posición de reposo

fisiológico hasta la posición de reposo funcional se llama convergencia inicial o tónica.

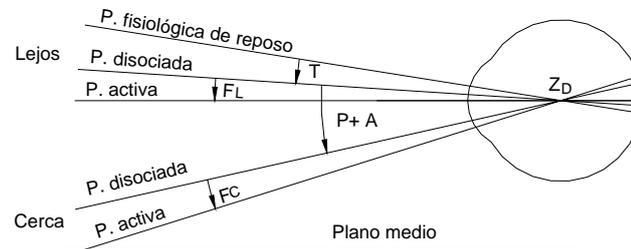


Figura 10.7. Diferentes posiciones de reposo y activas del ojo derecho cuando mira hacia la izquierda. Z_D es el centro de rotación, T la convergencia tónica, F_L la convergencia fusional (lejana), P la convergencia próxima, A la convergencia acomodativa y F_C la convergencia fusional (cercana).

Sí un ojo es ocluido y el otro ojo pasa de fijar un objeto lejano a fijar un objeto próximo situado en la misma línea de mirada, habrá un movimiento de convergencia del ojo ocluido desde la posición de reposo funcional hasta la posición disociada próxima. Este movimiento del ojo tapado se debe a la **convergencia acomodativa y próxima**. La acomodación estimula la convergencia y viceversa, pero se desconoce como están ligadas consensualmente. En el siguiente experimento se demuestra la existencia de convergencia acomodativa (*Figura 10.8*).

En la *Figura 10.8 a*, el ojo izquierdo se fija en un objeto lejano A y el ojo derecho está ocluido, en estas condiciones adopta una posición pasiva o disociada (posición de reposo funcional, en este caso). En (b), el ojo izquierdo cambia la fijación y la acomodación al punto B y se observa como el ojo derecho realiza un movimiento de convergencia. Este movimiento de convergencia del ojo derecho no es suficiente para llevar el eje visual sobre B, pero sí es capaz de hacerlo el reflejo de fusión cuando se destapa el ojo. Si se coloca una esfera positiva delante del ojo izquierdo (*Figura 10.8 b*), de potencia suficiente para reducir la acomodación a cero, el ojo derecho se mueve hacia fuera pero no regresa a la posición de reposo funcional en (a). Por lo tanto, la

convergencia acomodativa se ha eliminado y la convergencia que permanece es la *convergencia próxima*, que es aquella inducida por el conocimiento de que el objeto de mirada está próximo al observador.

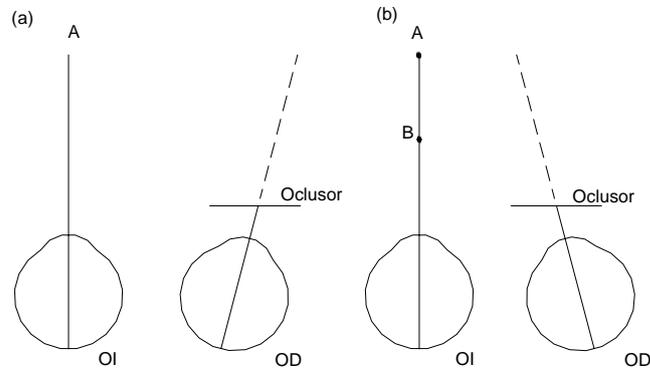


Figura 10.8. Demostración de la existencia de convergencia acomodativa.

En la *Figura 10.9* está representada la relación entre estos movimientos reflejos de convergencia próxima, donde los ojos miran desde un punto lejano un punto próximo en la línea media.

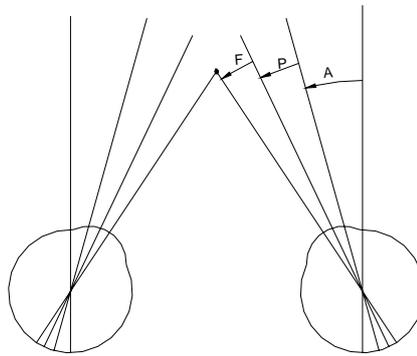


Figura 10.9. Relación entre los movimientos reflejos de convergencia. Convergencia acomodativa (A), convergencia próxima (P), convergencia fusional (F).

Uno de los factores más importantes para estimular la convergencia es la acomodación, y se denomina *convergencia acomodativa* a la convergencia estimulada por la acomodación cuando los ojos están disociados. Asimismo al converger los ejes visuales después de recibir un estímulo, se provoca la acomodación y esto se llama *acomodación convergente*.

En la práctica clínica la medida de la convergencia acomodativa se puede utilizar para modificar la corrección refractiva de un paciente y de esta manera proporcionarle una visión binocular más confortable. Por ejemplo, hay algunos sujetos que tienden a converger más en visión próxima. Si las lentes de lectura incorporan una adición esférica positiva, la demanda de acomodación se reduce, y en consecuencia también se reduce el exceso de convergencia. Inversamente, se puede disminuir la potencia positiva de manera que se estimule la convergencia, una vez probado que el paciente tiene suficientes reservas de acomodación.

La relación entre la convergencia acomodativa y la acomodación se conoce como índice **AC/A** y es la magnitud de variación de la convergencia causada por un aumento de la acomodación. Esta relación es constante para cada individuo y su valor es alrededor de $3,5 \Delta/D$; la convergencia expresada en dioptrías prismáticas y la acomodación en dioptrías. Este valor se altera en la presbicia o si varía el tono del músculo ciliar (ciclopegia). En clínica alteraciones en esta relación AC/A tiene importantes repercusiones en la génesis de ciertas anomalías musculares binoculares.

Uno de los métodos que permite determinar la razón AC/A es el siguiente: supongamos que, en visión lejana, se cubre temporalmente un ojo y abduce 2Δ , mientras que en visión próxima y con un objeto a -400 mm (desde la línea base interocular) el ojo cubierto disminuye la convergencia en 5Δ . Dado que la DI del sujeto es de 60 mm, para la fijación binocular se necesita una convergencia total de $6.000/400$ o 15Δ .

Como se muestra en la *Figura 10.10*, el ángulo entre los ejes visuales cuando los ojos están disociados es 10Δ , es decir 5Δ menos que la cantidad necesaria para la fijación binocular.

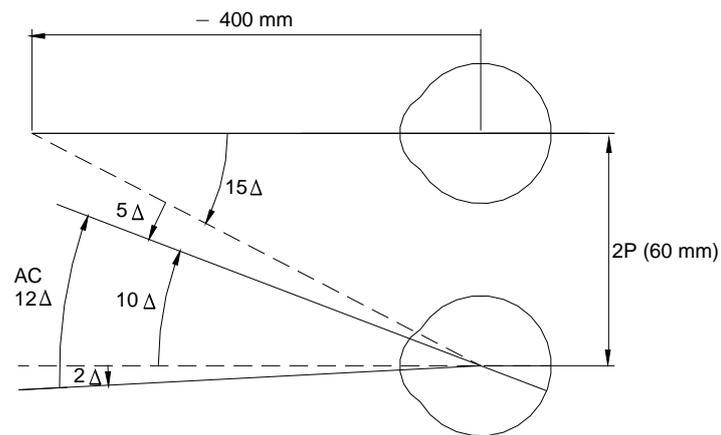


Figura 10.10. Convergencia acomodativa AC desde la posición lejana disociada a la posición próxima disociada (fusión libre).

Sin embargo, teniendo en cuenta que cuando la acomodación está relajada hay una divergencia del paralelismo de 2Δ , la cantidad total de convergencia acomodativa es de 12Δ . Si se ignora la pequeña distancia que hay desde el punto principal del ojo hasta el centro de rotación, la acomodación necesaria en este caso es de 2,50 D. Por lo tanto

$$AC/A = 12 / 2,50 = 4,8 \Delta/D$$

11 EL OJO ESQUEMÁTICO PARAXIAL

El objetivo de un ojo esquemático es proporcionar una base para el estudio teórico del ojo como un instrumento óptico. En su diseño se ignoran los aspectos complejos que no sean realmente importantes. Sin embargo, el grado hasta el que se puede simplificar el sistema refractivo varía en los diferentes campos de investigación. Por ejemplo, sustituir la córnea por un sistema refractivo simple no afectaría al tamaño de la imagen retiniana pero el diseño no sería aceptable para el estudio de las imágenes de Purkinje.

11.1 EL OJO ESQUEMÁTICO

Durante las última décadas se han hecho investigaciones a gran escala usando nuevas tecnologías de mayor fiabilidad, que han proporcionado datos más reales sobre las dimensiones oculares. Basándose en estos resultados se ha fundado la propuesta de Bennett y Rabbetts (1989) para un modelo esquemático de tres superficies refractivas, una para la córnea y dos para el cristalino, cuya potencia equivalente sería de +60,00 D, ya que la mayoría de las medidas del ojo oscilan alrededor de este valor, que además se corresponde con la potencia asignada al ojo reducido. De esta manera ambos modelos

adoptarían el mismo valor. En la *Tabla 11.1* se resumen sus conclusiones para el modelo esquemático del ojo.

Tabla 11.1. Modelo de ojo esquemático de Bennett y Rabbetts

Radios de curvatura	Córnea	+7,80
	Superficie anterior del cristalino	+11,00
	Superficie posterior del cristalino	-6,476
Separaciones axiales	Profundidad de la cámara anterior	3,60
	Espesor del cristalino	3,70
	Profundidad del cuerpo vítreo	16,79
	Longitud axial total	24,09
Índices refractivos	Aire	1
	Humor acuoso	1,336
	Cristalino	1,422
	Humor vítreo	1,336
Potencias de las superficies	Córnea	+43,08
	Cristalino: primera superficie	+7,82
	Cristalino: segunda superficie	+13,28
Potencias equivalentes	Cristalino	+20,83
	Ojo	+60,00
Distancias focales del ojo	Objeto (HF)	-16,67
	Imagen (H'F')	+22,27
Distancias desde el vértice de la córnea	Punto principal objeto	+1,51
	Punto principal imagen	+1,82
	Punto nodal objeto	+7,11
	Punto nodal imagen	+7,42
	Pupila de entrada	+3,05
	Pupila de salida	+3,70
	Punto focal objeto	-15,16
	Punto focal imagen	+24,09
Estado refractivo	R	0

A continuación se calculan los distintos puntos cardinales y distancias al vértice de la córnea utilizando como base este modelo esquemático de Bennett y Rabbetts.

11.2 CÁLCULO DE LOS PUNTOS CARDINALES

En la mayoría de los ojos esquemáticos primero, se determina la potencia equivalente F_C de la córnea y la posición de sus puntos principales (H_C, H'_C). Después, la potencia equivalente F_L del cristalino y la posición de sus puntos principales (H_L, H'_L). Posteriormente los dos sistemas se combinan, usando la relación

$$F = F_1 + F_2 - d/n F_1 F_2$$

en la que F es la potencia equivalente de una combinación de dos sistemas de potencias equivalentes F_1 y F_2 separados ópticamente por una distancia reducida d/n en metros. En el caso del ojo d se mide desde el punto principal imagen de la córnea hasta el punto principal objeto del cristalino ($H'_C H_L$), siendo n el índice de refracción del medio que separa los dos sistemas, es decir el humor acuoso.

11.2.1 Córnea

Las dos superficies de la córnea tienen radios de curvatura de +7,7 y +6,8 mm respectivamente y están separadas por un espesor axial de 0,5 mm. El índice refractivo n_2 de la sustancia corneal es 1,376 y el del humor acuoso n_3 1,336.

La potencia refractiva de la superficie anterior es

$$F_1 = \frac{(1,376 - 1)1000}{+7,7} = +48,83 \text{ D}$$

La potencia refractiva de la superficie posterior es

$$F_2 = \frac{(1,336 - 1,376)1000}{+ 6,8} = -5,88 \text{ D}$$

La potencia total o equivalente de la córnea (F_C) se calcula teniendo en cuenta que la distancia reducida es $\frac{d}{n_c} = \frac{0,5 \cdot 10^{-3}}{1,376} \text{ m}$, ya que tanto el punto principal imagen de la superficie anterior como el punto principal objeto de la superficie posterior coinciden con los vértices de cada una de las superficies respectivamente, y por lo tanto, ambos están separados una distancia igual a la del espesor central de 0,5mm

$$F_C = +48,83 - 5,88 - \left[\frac{0,5 \cdot 10^{-3}}{1,376} \times 48,83 \times (-5,88) \right] = +43,05 \text{ D.}$$

La posición del punto principal objeto se obtiene de la siguiente relación:

$$\frac{H_1 H_C}{n_1} = \frac{d}{n_2} \cdot \frac{F_2}{F_C}$$

Por lo tanto:

$$\frac{H_1 H_C}{1} = \frac{0,5 \cdot 10^{-3}}{1,376} \cdot \frac{-5,88}{43,05} = -0,050 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

La distancia del punto principal objeto desde el vértice de la superficie anterior de la córnea (VH_C) es de 0,050 mm por delante.

La posición del punto principal imagen se calcula mediante:

$$\frac{H'_2 H'_C}{n_3} = -\frac{d}{n_2} \cdot \frac{F_1}{F_C}$$

Por lo tanto:

$$H'_2 H'_C = -1,336 \cdot \frac{0,5 \cdot 10^{-3}}{1,376} \cdot \frac{48,83}{43,05} = -0,551 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

La distancia del punto principal imagen desde el vértice de la superficie posterior de la córnea es de 0,551 mm y por lo tanto, la distancia al vértice de la superficie anterior (VH'_C) es de

$$-0,551 + 0,5 = -0,051 \text{ mm.}$$

Ambos puntos principales casi coinciden uno con otro y están situados muy próximos al vértice corneal (V), H_C 0,050 mm y H'_C 0,051 mm. En consecuencia, una simplificación ópticamente adecuada para el ojo esquemático es una córnea con una superficie refractiva única. De esta manera, los cálculos se simplifican porque la potencia equivalente de la córnea es aquella de la superficie única y los dos puntos principales coinciden en su vértice V.

El radio de esta superficie, que separa el aire del humor acuoso, se puede calcular de manera que su foco imagen (VF'_C) coincida con el foco imagen de la córnea representada por dos superficies ($H'_C F'_C$).

$$VF'_C = H'_C F'_C = \frac{n'}{F_C} = \frac{1,336}{43,05} = 31,03 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

El radio se obtiene de la relación

$$\frac{n'}{f'} = \frac{n'-n}{R}$$

así

$$R = \frac{n'-n}{n'} \cdot VF'_c = \frac{1,336-1}{1,336} \cdot 31,03 = 7,80 \text{ mm.}$$

11.2.2 Cristalino

Los valores de 11,0 y -6,5 mm para los radios de la lente del cristalino adulto joven son valores más reales que los tradicionales de 10 y -6 mm que son demasiado bajos. Si además se ajusta el radio de la superficie posterior en -6,476 y se fija el índice de refracción del cristalino en 1,422 se alcanza la potencia exacta de +60,00 D para el ojo completo.

Las potencias de las dos superficies del cristalino se calculan aplicando la ecuación

$$F = \frac{n'-n}{R}$$

Potencia de la superficie anterior:

$$F_1 = \frac{(1,422-1,336) \cdot 1000}{+11,00} = +7,82 \text{ D}$$

Potencia de la superficie posterior :

$$F_2 = \frac{(1,336-1,422) \cdot 1000}{-6,476} = +13,28 \text{ D}$$

La potencia total o equivalente del cristalino completo (F_L) para un espesor central de 3,7 mm se obtiene de la siguiente expresión:

$$F_L = F_1 + F_2 - d/n_L \cdot F_1 \cdot F_2$$

Por lo tanto,

$$F_L = 7,82 + 13,28 - \frac{0,0037}{1,422} \cdot 7,82 \cdot 13,28 = +20,83 \text{ D}$$

Las posiciones de los puntos principales del cristalino completo son,

Punto principal objeto:

$$\frac{H_1 H_L}{n_{HA}} = \frac{d}{n_L} \cdot \frac{F_2}{F_L}$$

$$H_1 H_L = 1,336 \cdot \frac{0,0037}{1,422} \cdot \frac{13,28}{20,83} = 2,21 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

La distancia referida al vértice de la superficie reducida de la córnea es:

$$VH_L = VH_1 + H_1 H_L = 3,60 + 2,21 = 5,81 \text{ mm}$$

siendo VH_1 la profundidad de la cámara anterior

Punto principal imagen:

$$\frac{H'_2 H'_L}{n_{HV}} = -\frac{d}{n_L} \cdot \frac{F_1}{F_L}$$

$$H'_2 H'_L = -1,336 \cdot \frac{0,0037}{1,422} \cdot \frac{7,82}{20,83} = -1,305 \cdot 10^{-3} \text{ m.}$$

La abcisa referida al vértice corneal V es

$$VH'_L = VH_L + H_L H'_L$$

$$H_L H'_L = 3,7 - (2,21 + 1,305) = 0,185 \text{ mm}$$

$$VH'_L = 5,81 + 0,185 = 6,00 \text{ mm.}$$

El cristalino también se puede simplificar reduciéndolo a una lente hipotética de potencia equivalente +20,83 D y espesor cero, situada a 5,85 mm del vértice corneal, que es aproximadamente la posición media de los puntos principales de la lente del cristalino. Los elementos imagen de este modelo simplificado se confunden con los del ojo esquemático y los elementos objeto difieren poco

11.2.3 El ojo completo

La potencia equivalente del ojo se calcula a partir de la expresión

$$F_o = F_C + F_L - d/n_{HA} \cdot F_C \cdot F_L$$

En el caso del ojo esquemático de tres superficies *Figura 11.1* la distancia reducida es

$$\frac{d}{n_{HA}} = \frac{H'_C H_L}{n_{HA}}$$

La distancia d se obtiene de sumar la profundidad de la cámara anterior más la distancia $H_1 H_L$, por lo tanto $d = 3,6 + 2,21 = 5,81 \text{ mm.}$

Por lo tanto,

$$F_o = 43,08 + 20,83 - \frac{0,00581}{1,336} \times 43,08 \times 20,83 = +60,00 \text{ D.}$$

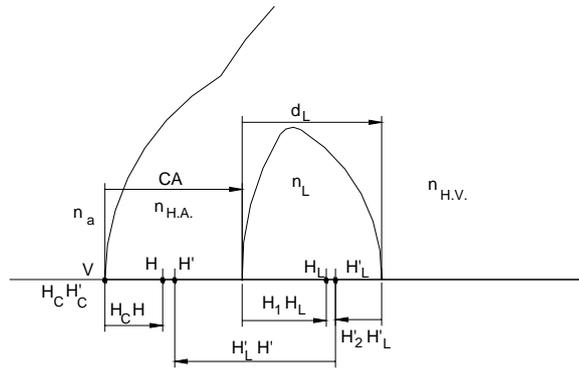


Figura 11.1. Modelo esquemático de tres superficies. Los puntos principales del ojo H , H' están situados en la cámara anterior. Los puntos principales de la córnea H_C , H'_C coinciden en el vértice V y H_L , H'_L representan los puntos principales del cristalino.

Las distancias focales son:

Distancia focal objeto:

$$HF_o = -n / F_o = -1 / 60,00 = -16,67 \cdot 10^{-3} \text{ m.}$$

Distancia focal imagen:

$$H'H'_o = n' / F_o = 1,336 / 60,00 = 22,27 \cdot 10^{-3} \text{ m.}$$

Las posiciones de los puntos principales son:

Punto principal objeto:

$$\frac{H_C H}{n_{\text{aire}}} = \frac{d}{n_{HA}} \cdot \frac{F_L}{F_o}$$

$$H_C H = \frac{0,00581}{1,336} \cdot \frac{20,83}{60,00} = +1,51 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

El punto principal objeto del ojo completo se encuentra a una distancia de 1,51 mm desde el vértice de la córnea.

Punto principal imagen

$$\frac{H'_L H'}{n_{HV}} = -\frac{d}{n_{HA}} \cdot \frac{F_C}{F_o}$$

$$H'_L H' = -1,336 \cdot \frac{0,00581}{1,336} \cdot \frac{43,08}{60,00} = -4,17 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

La distancia del punto principal imagen desde el vértice de la córnea es:

$$VH' = VH'_L + H'_L H' = 6,00 - 4,17 = 1,82 \text{ mm.}$$

Ambos puntos principales están situados en la cámara anterior y la distancia entre ellos es:

$$HH' = VH' - VH = 1,82 - 1,51 = 0,31 \text{ mm.}$$

En el modelo esquemático simplificado, en el que el cristalino se considera una lente delgada, los planos principales objeto e imagen del sistema óptico están muy próximos, siendo la separación entre ellos de 0,12 mm.

Las distancias desde el vértice de la córnea a los focos son:

Foco objeto:

$$VF = VH + HF = 1,51 - 16,67 = -15,16 \text{ mm.}$$

Foco imagen:

$$VF' = VH' + H'F' = 1,82 + 22,27 = 24,09 \text{ mm.}$$

Siendo este valor el correspondiente a la longitud axial para este ojo emétrope.

Los puntos nodales no coinciden con los principales ya que el primer medio, el aire y el último el vítreo, tienen distinto índice de refracción y en un sistema positivo como el ojo, estos puntos se desplazan hacia el medio más denso. Si se tiene en cuenta que en cualquier sistema refractivo la distancia del punto nodal objeto al punto principal objeto es igual a la distancia del punto nodal imagen al punto principal imagen, en el caso del ojo completo esta distancia es

$$HN = H'N' = /H'F'/ - /HF/ = 22,27 - 16,67 = 5,60 \text{ mm.}$$

Las distancias desde el vértice de la córnea a los puntos nodales son:

$$VN = VH + HN = 1,51 + 5,60 = 7,11 \text{ mm.}$$

$$VN' = VH' + H'N' = 1,91 + 5,61 = 7,42 \text{ mm.}$$

La distancia que existe entre los puntos nodales es la misma que hay entre los puntos principales

$$NN' = VN' - VN = 0,31 \text{ mm.}$$

11.3 EL OJO ESQUEMÁTICO ACOMODADO

Cuando el ojo acomoda, ambas superficies de la lente del cristalino, pero especialmente la anterior, se vuelven más curvas. Al mismo tiempo, el espesor central se incrementa y la lente se desplaza ligeramente hacia delante dentro de la cámara anterior. En el ojo esquemático, se considera que el vértice posterior de la lente permanece estacionario. En el estado completamente acomodado (alrededor de 8,5 D) el espesor axial se incrementa aproximadamente 0,4 mm,

desde 3,6 mm hasta 4,0 mm, y por consiguiente la profundidad de la cámara anterior disminuye 0,4 mm, hasta 3,2 mm.

El efecto de la acomodación sobre la posición de los puntos principales del ojo es relativamente pequeño. Ambos se mueven hacia la retina aproximadamente 0,25 mm en el estado completamente acomodado considerado. Al mismo tiempo, ambos puntos nodales se mueven aproximadamente 0,5 mm hacia la córnea. La *Figura 11.2*, dibujada a escala, muestra estos movimientos relativos.

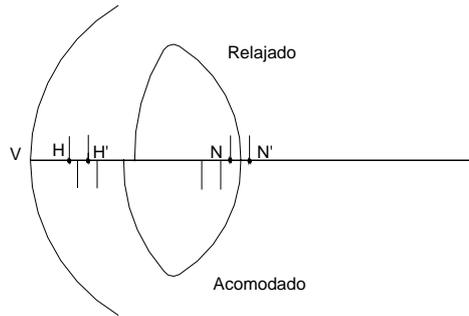


Figura 11.2. Comparación de las posiciones de los puntos principales H, H' y de los puntos nodales N, N' del ojo esquemático en sus estados relajado y completamente acomodado.

En el ojo completamente acomodado el incremento que experimenta la potencia del cristalino es superior al aumento que se produce en la potencia del ojo. Esto se debe a la separación que existe entre los dos componentes principales del sistema refractivo del ojo. Si se ignoran las variaciones, originadas por la acomodación, en la distancia entre la córnea y el punto principal objeto del cristalino (5,81 mm), la potencia equivalente del ojo se puede expresar por

$$F_o \approx +43 + F_L - 0,0058/1,336 \cdot 43,08 \cdot F_L$$

$$F_o \approx +43 + 0,81 \cdot F_L$$

Por lo tanto, un cambio de ΔF_L en la potencia del cristalino produciría un cambio de aproximadamente $0,8 F_L$ en la potencia equivalente del ojo.

11.4 RELACIONES PARAXIALES APLICADAS AL OJO ESQUEMÁTICO

Las ecuaciones fundamentales

$$S' = S + F_o$$

$$R' = R + F_o$$

así como

$$y' = y (S / S') \quad \text{o} \quad y' = y (R / R')$$

se aplican al ojo esquemático teniendo en cuenta que las distancias s y s' , o r y r' , se miden desde los puntos principales objeto e imagen respectivamente (*Figura 11.3*). A diferencia de lo que ocurría en el ojo reducido, en el ojo esquemático la distancia r' no representa la longitud axial total.

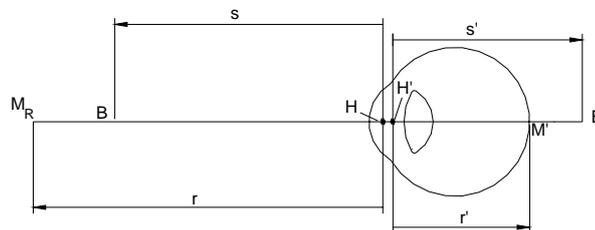


Figura 11.3. Medida de las distancias conjugadas desde los puntos principales del ojo.

Ejemplo 1

¿Cuál es la longitud axial de un ojo esquemático de +60,00 D, miope de 4,00 D y cuál es la distancia desde el vértice corneal hasta el punto remoto?

$$R' = R + F_o = -4,00 + 60,00 = +56 \text{ D}$$

$$r' = n'/R' = 1,336 \cdot 1000 / +56 = 23,85 \text{ mm}$$

La longitud axial VM' es

$$VM' = VH' + H'M' = 1,82 + 23,85 = 25,67 \text{ mm}$$

$$r = HM_R = 1000/R = 1000 / -4,00 = -250 \text{ mm}$$

La distancia VM_R desde el vértice corneal hasta el punto remoto se calcula de

$$VM_R = VH + HM_R = 1,51 - 250 = -248,5 \text{ mm}$$

Ejemplo 2

Determinar la posición y tamaño de la imagen óptica de un objeto de 50 mm de alto situado a una distancia de 40 cm del vértice corneal del ojo esquemático de +60,00 D desacomodado.

La distancia objeto medida desde el punto principal H es

$$s = - (400 + 1,51) = -401,51 \text{ mm}$$

$$S = 1000/s = -2,49 \text{ D}$$

$$S' = S + F_o = -2,49 + 60,00 = +57,51 \text{ D}$$

$$s' = 1,336/S' = +23,23 \text{ mm}$$

Si la posición imagen se mide desde el vértice corneal habrá que sumar la distancia del punto principal imagen desde el vértice,

$$23,23 + 1,82 = 25,05 \text{ mm}$$

El tamaño de la imagen óptica se obtiene de

$$y' = y \cdot \frac{S}{S'} = 50 \cdot \frac{-2,49}{+57,51} = -2,16 \text{ mm}$$

11.5 PUPILAS DE ENTRADA Y SALIDA EN EL OJO ESQUEMÁTICO DE TRES SUPERFICIES

En el ojo esquemático de tres superficies, con la pupila real situada tangente a la superficie anterior del cristalino, la pupila de entrada es la imagen de la pupila real formada por la córnea. Considerando el centro E_o de la pupila como un objeto para la córnea, se puede calcular la posición de su imagen teniendo en cuenta que la pupila se encuentra a 3,6 mm de la superficie corneal única (*Figura 11.4 a*). Por lo tanto, siendo $n = 1,336$ y $n' = 1$

$$S' = S + F_C$$

$$S = 1,336 \cdot 1000 / -3,6 = -371,11 \text{ D}$$

$$S' = -371,11 + 43,08 = -328,03 \text{ D}$$

$$s' = 1000/S' = -3,05 \text{ mm}$$

La pupila de entrada se encuentra aproximadamente a 3 mm detrás del vértice corneal. El tamaño de la pupila de entrada ($y_{E'}$) se obtiene a partir de la fórmula del aumento,

$$B' = \frac{y'}{y} = \frac{s'}{s} \cdot \frac{n}{n'} \quad B'_C = y_{E'} / y_R = S / S' = 1,131$$

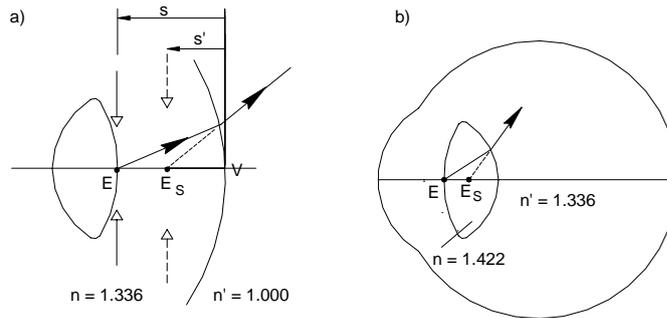


Figura 11.4. a) Posición de la pupila de entrada en el ojo esquemático de tres superficies. C_1 es el centro de curvatura de la córnea. b) Posición de la pupila de salida. C_3 es el centro de curvatura de la superficie posterior del cristalino.

La pupila de salida es la imagen de la pupila real dada por el cristalino (*Figura 11.4 b*). Debido a que el borde del iris que forma los límites de la pupila real está aproximadamente en el mismo plano que el vértice anterior del cristalino, esta pupila es conjugada consigo mismo por refracción en esta superficie. Por consiguiente, la pupila de salida se puede localizar considerando solamente la refracción en la superficie posterior del cristalino. Por lo tanto, siendo $n = 1,422$, $n' = 1,336$ y el espesor del cristalino 3,7 mm

$$S = 1,422 \cdot 1000 / -3,7 = -384,32 \text{ D}$$

$$S' = S + F_L = -384,32 + 13,28 = -371,04 \text{ D}$$

$$s' = 1,336 \cdot 1000 / S' = -3,60 \text{ mm}$$

La pupila de salida está situada muy próxima a la pupila real, es decir a una distancia de $(3,7 - 3,60)$ o $0,10$ mm del polo anterior del cristalino y a una distancia de $3,70$ mm del vértice corneal. Su tamaño se obtiene a partir del aumento

$$B'_L = y_{s'} / y_R = S / S' = 1,036$$

La pupila de salida es menor que la pupila de entrada, pero ambas son de mayor diámetro que la pupila real.

El aumento entre pupilas introducido por todo el sistema es:

$$B' = y_s / y_e = B'_L \cdot y_R / B'_C \cdot y_R = B'_L / B'_C = 1,036 / 1,131 = 0,916$$

Al mirar a los ojos de una persona se observa y mide la posición y tamaño de su pupila de entrada. Por lo tanto, el tamaño de su pupila de salida es $0,916$ veces el tamaño de la pupila de entrada. Por ejemplo, para una pupila de entrada de 4 mm, el diámetro de la pupila de salida será de $3,66$ mm.

Con respecto al sistema óptico del ojo completo, las pupilas de entrada y salida son puntos conjugados. Un rayo incidente dirigido hacia el centro E de la pupila de entrada será refractado por la córnea de modo que pase a través del centro E_o de la pupila real; luego, después de la refracción en el cristalino, emergerá como si procediera del centro E' de la pupila de salida (ver *Figura 1.7*)

11.6 TAMAÑO DE LAS IMÁGENES RETINIANAS BORROSAS EN EL OJO ESQUEMÁTICO

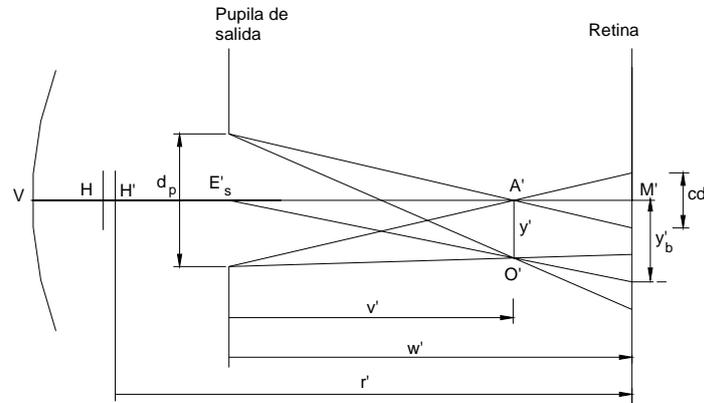


Figura 11.5. Formación del círculo de difusión y tamaño básico y'_b de la imagen retiniana en un ojo esquemático miope.

Las pupilas de entrada y salida del ojo juegan un importante papel en el estudio de las imágenes retinianas borrosas en el ojo esquemático, donde se aplican los mismos principios básicos que en el ojo reducido. En la *Figura 11.5*, un objeto AO (no mostrado), situado sobre el eje óptico de un ojo esquemático miope, da lugar a que se forme una imagen óptica nítida $A'O'$ delante de la retina. El diagrama indica el pincel de rayos, limitado por la pupila de salida, que enfoca en A' y O' y continúa para formar círculos de difusión sobre la retina. Los centros de estos círculos están determinados por los rayos $E'A'$ y $E'O'$ desde el centro E' de la pupila de salida. Al igual que en el caso del ojo reducido, el tamaño básico de la imagen retiniana es la distancia entre los centros de los círculos de difusión limitantes. Si d_p es el diámetro de la pupila de entrada (no mostrada); d'_p es el diámetro de la pupila de salida; $v' = E'A'$ la distancia desde E' a la imagen óptica; $w' = E'M'$ la distancia desde E' a la retina; $y' = A'O'$ el tamaño de la imagen óptica; y'_b el tamaño básico de la imagen retiniana y cd el diámetro de los círculos de difusión en retina; entonces, de la *Figura 11.5*, se pueden encontrar las cantidades y'_b y cd a partir de

$$y'_b = (w' / v') y'$$

y

$$cd = d'_p \left(\frac{v' - w'}{v'} \right)$$

Ejemplo: Un miope con refracción ocular $-3,50$ D observa a una distancia de 2 m una letra de 50 mm de altura. Calcular las dimensiones de la imagen retiniana borrosa, tomando como modelo las constantes ópticas del ojo esquemático desacomodado de Bennett y Rabbetts con una pupila de entrada de 4 mm.

Para este modelo de ojo el aumento de la pupila de salida es de $0,916$. Por lo tanto su diámetro d'_p es $4 \times 0,916$ o $3,664$ mm

La distancia imagen $H'A'$, medida desde el punto principal imagen del ojo, se obtiene de

$$S' = S + F_o = -0,50 + 60,00 = +59,50 \text{ D}$$

y así

$$H'A' = 1,336 / 59,50 = 22,45 \text{ mm}$$

A partir de la *Tabla 6.1*, la distancia $H'E'$ es igual a

$$VE' - VH' = 3,70 - 1,82 = 1,88 \text{ mm.}$$

Por lo tanto

$$v' = 22,45 - 1,88 = 20,57 \text{ mm}$$

El valor de r' se obtiene de

$$R' = R + F_o = -3,50 + 60,00 = 56,50$$

así que

$$r' = H'M' = 1.336 / 56,50 = 23,65 \text{ mm}$$

y

$$w' = r' - H'E' = 23,65 - 1,88 = 21,77 \text{ mm}$$

El tamaño de la imagen óptica nítida es

$$y' = y \ S / S' = 50 \times -0,50 / 59,50 = -0,420 \text{ mm}$$

El tamaño básico de la imagen retiniana es

$$y'_b = (w' / v') y' = - (21,77 / 20,57) \times 0,420 = -0,444 \text{ mm}$$

Y el diámetro del círculo de difusión es

$$cd = d_p' \frac{v' - w'}{v'} = 3,664 \left(\frac{20,57 - 21,77}{20,57} \right) = -0,214 \text{ mm}$$

Teniendo en cuenta que la razón de borrosidad cd / y'_b es 0,48, probablemente se podrá leer la letra.

Si se comparan estos resultados con los que se obtienen utilizando el ojo reducido de potencia +60,00 D se observa que las cantidades casi no difieren. En este ejemplo, el tamaño básico de la imagen retiniana en el ojo reducido se obtiene de

$$y'_b = y \ S / R' = 50 \times -0,50 / 56,50 = -0,442 \text{ mm}$$

Y el tamaño del círculo de difusión de

$$cd = 4 \left(\frac{56,5 - 59,5}{56,5} \right) = -0,212 \text{ mm}$$

11.7 DEFECTOS ÓPTICOS DE LA IMAGEN RETINIANA

La imagen formada por el sistema óptico del ojo no es perfecta porque el ojo sufre aberraciones y errores de centrado, pero esta imagen formada en la retina no es la que finalmente se percibe. La imagen es información aportada a la retina para la codificación y transmisión a los centros visuales del cerebro.

Todo sistema de lentes tiene defectos inherentes de los que el ojo participa hasta cierto punto. Lo importante es recordar que, aunque el ojo posee estos defectos, los presenta en tan pequeña proporción que, a efectos funcionales, su presencia no tiene importancia. Los organismos vivos nunca están contruidos según leyes matemáticas aplicadas exactamente y las inexactitudes teóricas que puedan mostrar en su configuración se ven más que compensadas por la adaptabilidad y la plasticidad que permite su naturaleza esencialmente flexible. El ojo no es en modo alguno un instrumento óptico perfecto, pero su potencial de acomodación, campo de visión, adaptación, y resolución le hacen único.

Algunos defectos son inherentes al ojo *normal* y por consiguiente fisiológicos; otros tienen que considerarse anormales o patológicos.

La causa de estos defectos fisiológicos, que disminuyen la calidad de la imagen retiniana, se debe a:

- La naturaleza de la luz, que es la causa de la difracción y difusión de la luz en el ojo.
- La forma y constitución del ojo que da lugar a la presencia de aberraciones oculares, siendo las más importantes la aberración esférica y la aberración cromática.

Los principales defectos o irregularidades del sistema dióptrico ocular se deben principalmente a que:

- Los dióptrios no forman un sistema óptico centrado; los ejes de la córnea y del cristalino no están en línea recta.
- El cristalino cambia la forma de sus superficies y tiene distintos índices de refracción.
- La córnea, que es el dióptrio más potente, presenta generalmente irregularidades en su superficie (cierto grado de astigmatismo).
- Los medios transparentes pueden presentar opacidades.

11.7.1 Aberración esférica ocular

Las superficies esféricas de radio constante refractan los rayos de luz en la misma proporción sólo, si los rayos inciden cerca del eje óptico (óptica paraxial). Los rayos luminosos que penetran en el ojo cerca del borde pupilar se refractan más que los rayos paraxiales y por lo tanto, los rayos periféricos alcanzan el foco más rápidamente que los centrales. Consecuentemente la imagen retiniana de un punto formada por este sistema es una mancha borrosa que está afectada de aberración esférica.

En la *Figura 11.6* Los rayos luminosos que parten de un punto A situado en el eje, penetran en el ojo por la pupila de entrada a diversas alturas del eje (y). Los rayos de luz que entran cerca de la periferia de la córnea son más refractados que aquellos que pasan por su centro y enfocan en A' más cerca de la córnea que los rayos centrales que enfocan en A'o.

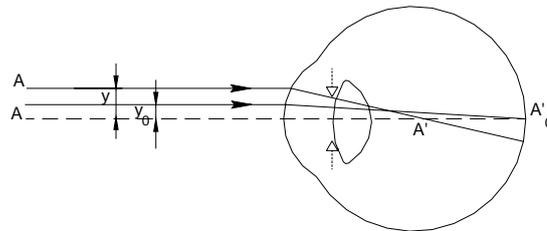


Figura 11.6. Aberración esférica del ojo.

La imagen retiniana de un punto monocromático es una mancha circular (círculo de mínima difusión) que comprende las regiones más iluminadas. Estas regiones más iluminadas son las trazadas sobre la retina por las dos secciones de la cáustica, es decir, el lugar de acumulación de la energía luminosa (*Figura 11.7*).

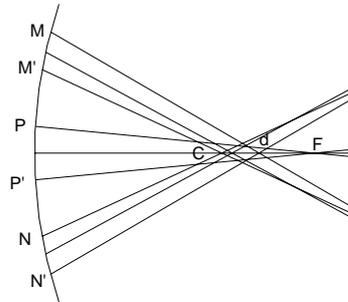


Figura 11.7. Aberración esférica.

La superficie cáustica comprende dos secciones:

- La sección sagital
- La sección marginal, de revolución alrededor del eje.

Según que los rayos marginales se refracten más o menos que los centrales, se dice que hay aberración según la regla o contra la regla.

En el ojo en reposo, desacomodado, hay aberración esférica según la regla y en el ojo acomodado, aberración esférica contraria a la regla, debido a que durante la acomodación la parte axial del cristalino aumenta más de convergencia que la periferia y además la periferia es obturada por la pupila al contraerse y solo deja descubierta la parte axial del cristalino.

La aberración esférica sin embargo, no resulta molesta para la visión y suele pasar inadvertida, a menos que la pupila este ampliamente dilatada.

Los factores que tienden a reducir esta aberración en el ojo son:

a) La curvatura peculiar de la córnea. Ésta no es una superficie esférica de radio constante sino que es más aplanada en la periferia que en la parte central, lo que contribuye a reducir el efecto de la aberración cuando la pupila está dilatada (*Figura 11.8 b*).

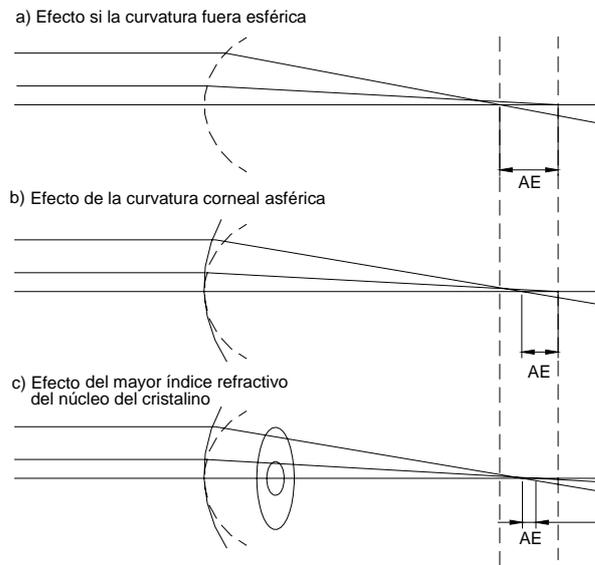


Figura 11.8. Aberración esférica ocular (AE). Mecanismos compensadores.

b) La distribución de los índices en el interior del cristalino. Las zonas centrales tienen un índice de refracción mayor y están ordenadas en capas de más curvatura que las periféricas (*Figura 11.8 c*). De esta forma la zona axial del cristalino tiene mayor potencia refractiva que la periferia, tendiendo por tanto a nivelar el efecto general. Durante la acomodación la aberración esférica también disminuye porque varía la repartición de los índices de refracción en el interior del cristalino

c) El tamaño pupilar ya que el iris limita el paso de los rayos periféricos. La disminución de agudeza visual que ocurre cuando la pupila está dilatada se

debe fundamentalmente a esta aberración esférica. El tamaño pupilar óptimo sería de 2 a 2,5 mm.

La aberración esférica se incrementa proporcionalmente al cuadrado de la abertura relativa. Es decir, si la pupila es muy pequeña, la aberración esférica lo será también. Este es el caso de la pupila contraída (miosis) que sólo permite la entrada de un haz de rayos estrecho.

Por lo tanto, la aberración esférica tiene escasa importancia en la visión fotópica o diurna, mientras que en la visión escotópica (pupila dilatada) es más importante y es uno de los factores que intervienen en la miopía nocturna.

d) El efecto Stiles-Crawford o selectividad direccional de los conos que hace que éstos sean más sensibles a los rayos centrales o axiales que a los rayos que entran oblicuos a través de la periferia de la córnea. Esta sensibilidad direccional de los conos limita el efecto visual de la aberración esférica residual en el ojo.

Actualmente se ha comprobado que el ojo está muy poco afectado de aberración esférica. Incluso para grandes diámetros pupilares la aberración esférica raramente excede de 1,00 D. La principal razón de este hecho es que la córnea no es esférica sino más plana en la periferia que en el centro. Por lo tanto los rayos periféricos son menos refractados que si la córnea fuera esférica.

11.7.2 Aberración cromática

Esta aberración es originada por la dispersión de la luz blanca al atravesar los dióptrios oculares. Se refiere a la incapacidad del sistema óptico ocular para enfocar diferentes longitudes de onda simultáneamente (*Figura 11.9*).

La luz blanca está formada por radiaciones de longitud de onda diferente que, consideradas por separado, constituyen los distintos colores del espectro. Como los índices de refracción de los diferentes medios oculares varían con la longitud de onda (para longitudes de onda larga el índice disminuye y para longitudes de onda corta el índice aumenta), al variar estos, también lo harán los puntos cardinales del ojo teórico, es decir, que la potencia del ojo será

diferente para cada longitud de onda, siendo menor para las longitudes de onda larga y mayor para las longitudes de onda corta.

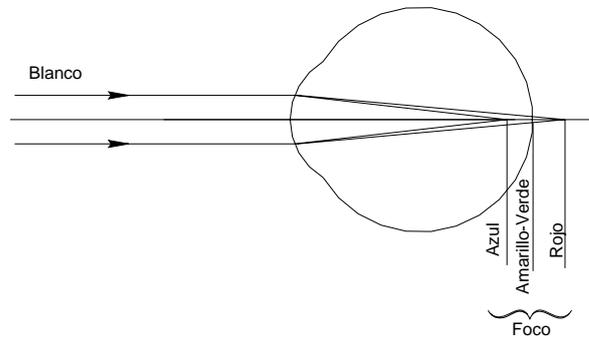


Figura 11.9. Aberración cromática en el ojo emélope

En la *Figura 11.10* un manantial de luz B emite dos radiaciones, una verde (v) y otra azul (a). El verde se refracta menos y formará su imagen en B'_v , mientras que el rayo azul formará su imagen en B'_{az} y en retina se obtendrá una mancha borrosa. Entre todas las radiaciones que intervienen en la formación de la imagen retiniana, la que produce su imagen al nivel exacto de la retina recibe la denominación de longitud de onda de enfoque (λ_0). Pero para las otras longitudes de onda se obtiene en la retina un círculo de difusión que será función de la posición de la retina con relación al fascículo luminoso y de la longitud de onda de enfoque, siendo esta a su vez función del estado de acomodación.

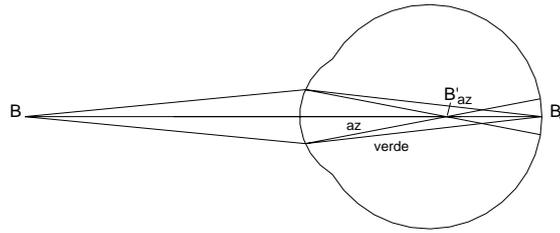


Figura 11.10. Aberración cromática con una fuente que emite una radiación verde y otra azul.

En la acomodación el ojo elige la longitud de onda de enfoque que mejor sirva a sus intereses. La imagen así obtenida se denomina "mejor imagen". Según las deducciones de Ivanoff, no solo existe una longitud de onda de enfoque, sino toda una serie de ellas, según los diferentes casos, empleando el ojo esta propiedad para ahorrar acomodación.

Puesto que el índice de refracción de los medios ópticos disminuye a medida que aumenta la longitud de onda, las ondas cortas del extremo azul del espectro visible son más refractadas que las longitudes de onda largas del extremo rojo. Un emétrope se transforma en hipermétrope para el rojo y se convierte en miope para el azul, adquiriendo estas ametropías cromáticas valores ligeramente superiores a media dioptría. Sin embargo, un miope verá más nítidos los objetos sobre un fondo rojo, mientras que el hipermétrope los verá más nítidos en un fondo verde (*Figura 11.11*).

Una consecuencia de la aberración cromática es que origina una diferencia cromática en el aumento, es decir, se producen diferencias tanto en tamaño como en la posición axial de las imágenes retinianas cromáticamente diferentes formadas con luz blanca.

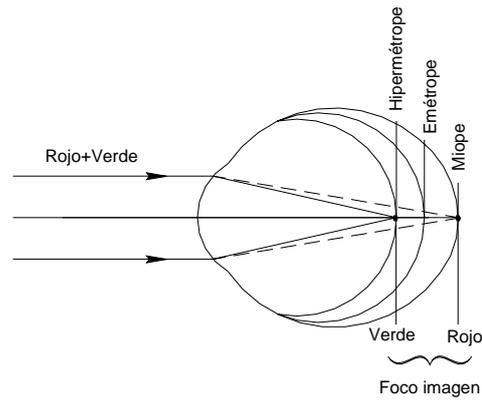


Figura 11.11. Test dicromático.

En realidad la aberración cromática del ojo, aunque es muy elevada, no resulta molesta y ello es debido a los siguientes factores:

a)- Principalmente la eficacia luminosa del ojo, que tiene una sensibilidad luminosa determinada a las diferentes radiaciones, existiendo unas longitudes de onda para las que el ojo es muy sensible y otras que es incapaz de ver como por ejemplo el infrarrojo.

Algunos de los valores fotópicos son:

<i>Longitud de onda</i>	<i>Sensibilidad relativa</i>
400 nm	0,0004
480 nm	0,139
510 nm	0,503
555 nm	1
610 nm	0,503
700 nm	0,004

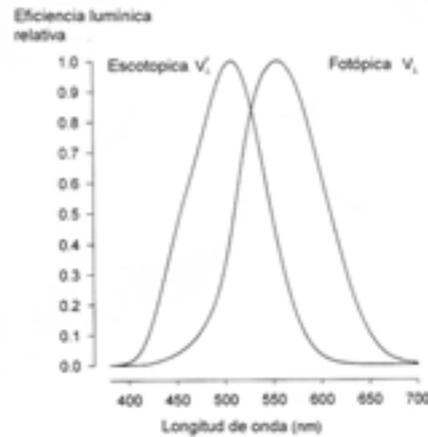


Figura 11.12. Sensibilidad luminosa espectral del sistema visual.

Según la curva de sensibilidad luminosa espectral fotópica (Figura 11.12), la región central de la curva, que corresponde al amarillo de 550 nm, es la que interviene fundamentalmente en la formación de la imagen, mientras que las radiaciones de foco más largo y más corto forman círculos de intensidad relativamente baja en comparación con los otros y sus imágenes son por lo tanto desdeñables.

b)- La retina.

La región del espectro más perjudicial para la formación de la imagen es la zona de longitudes de onda corta, en cuanto a la aberración cromática se refiere. Es por ello que en el centro de la fovea, la zona más importante para la resolución visual fina, no hay conos sensibles al azul, ni bastones que son más sensibles a radiaciones de longitudes de onda corta.

Además en la mácula hay un pigmento inerte (pigmento macular amarillo) que absorbe fuertemente la luz azul y violeta que así no afecta a los conos foveales.

c)- El cristalino actúa como un filtro ya que absorbe determinadas radiaciones de onda corta. Con la edad este pigmento se va haciendo más

denso y su capacidad de absorción aumenta, dando lugar a menor aberración cromática pero también a un empobrecimiento de la visión del color.

Los afáquicos carecen del efecto filtrante del cristalino y por ello ven mejor el extremo violeta del espectro, sin embargo la aberración cromática puede alcanzar varias dioptrías.

d)- Cuando aumenta el tamaño pupilar la aberración cromática aumenta, pero la influencia no es tan marcada como en el caso de la aberración esférica.

Normalmente las aberraciones esféricas y cromáticas intervienen simultáneamente, ya que el ojo no trabaja ni con luz monocromática, como hemos supuesto al estudiar la aberración esférica, ni cumpliendo las condiciones de aproximación de Gauss, como hemos considerado en la aberración cromática.

Resumiendo, estas aberraciones oculares están compensadas por :

- la forma parabólica de la córnea y el cristalino.
- el índice de refracción del núcleo cristalino superior al de la corteza.
- una pupila relativamente pequeña
- la fovea único lugar de resolución
- los efectos filtrantes del cristalino y del pigmento macular
- el efecto de onda guiada de los fotorreceptores.

11.7.3 Aberraciones periféricas

El astigmatismo oblicuo, coma y distorsión de la imagen, hacen que las imágenes formadas en las zonas periféricas de la retina sean menos nítidas que las de la zona central.

Estas aberraciones están neutralizadas en gran parte por la forma peculiar del ojo. La curvatura de la retina ($r = 10$ mm) tiene un efecto muy importante sobre la eficacia de la visión periférica y el cálculo demuestra que se ha conseguido una aproximación muy cercana a las condiciones ópticas ideales.

Pero aunque no se alcance el ideal, la eficacia funcional del ojo aumenta notablemente si se sacrifica en parte la nitidez de las imágenes periféricas para obtener las mejores condiciones para las imágenes centrales.

En la dióptrica ocular se deben considerar más las aberraciones geométricas que intervienen en la visión central, ya que la visión es mucho más nítida para las imágenes que se forman en la mácula y no lo es para las imágenes periféricas donde la resolución es muy pobre, por lo que las aberraciones periféricas no tendrán tanta importancia.

11.7.4 Descentrado

La formación de la imagen ideal exigiría que las superficies refringentes del sistema óptico del ojo estuvieran centradas exactamente, es decir que los centros de curvatura de la superficie corneal y de las dos superficies de la lente estuvieran exactamente en el eje óptico. El centrado del ojo nunca es exacto, pero las desviaciones suelen ser tan pequeñas como para ser despreciables desde el punto de vista funcional. Según Tscherning, el defecto habitual es que el centro de curvatura de la córnea está situado por debajo del eje del cristalino

Como ya se ha comentado, la fovea no suele estar situada sobre el eje óptico, sino aproximadamente 1,25 mm por debajo de su lado temporal. Por lo tanto cuando miramos un objeto no lo hacemos directamente a lo largo del eje óptico, sino a lo largo de una línea que une el objeto con la fovea y pasa por el punto nodal, esta línea se llama eje visual.

11.8 DIMENSIONES Y PROPIEDADES DE LAS IMÁGENES DE PURKINJE.

La luz que se refleja en los diferentes dióptricos oculares da origen a las imágenes de Purkinje, que son las imágenes que los objetos luminosos forman por reflexión sobre las superficies ópticas del ojo. La cantidad de luz reflejada dependerá del ángulo de incidencia y de la diferencia de los índices de refracción.

Estas imágenes fueron observadas por primera vez por el checo Purkinje en 1.821 con la ayuda de una bujía y Sanson en 1.837 las utilizó con fines diagnósticos. Estas imágenes se observan en una cámara oscura e iluminando el ojo del sujeto observado con una fuente luminosa de forma triangular o alargada, situada a 35° del eje visual y a una distancia de 50 cm a un metro de dicho ojo.

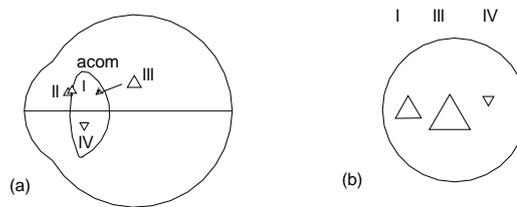


Figura 11.13. a) Posiciones relativas y tamaños de las imágenes de Purkinje de un objeto lejano situado a 20° sobre el eje óptico. b) La apariencia en la pupila.

Las imágenes son cuatro, dos corneales y otras dos lenticulares (*Figura 11.13*).

La *primera imagen* se produce por reflexión sobre la cara anterior de la córnea que actúa como un espejo convexo y da lugar a una imagen virtual y derecha de la fuente luminosa. Es la imagen más intensa debido a la gran diferencia de índices de refracción entre el aire y la sustancia de la córnea. Está situada aproximadamente a nivel del plano pupilar, y tiene un tamaño intermedio entre las imágenes que producen las dos superficies del cristalino. Esta imagen se conoce también como reflejo luminoso corneal.

La *segunda imagen* se produce sobre la cara posterior de la córnea. Es de escasa intensidad debido a que la diferencia entre los índices de refracción de la córnea y el humor acuoso es muy pequeña. Además está enmascarada por la primera imagen que se forma muy próxima a ella ya que el radio de curvatura de la cara posterior es ligeramente inferior al de la cara anterior. Todo ello hace que esta imagen pase desapercibida. Su tamaño también es ligeramente menor.

La *tercera imagen* de Purkinje-Sanson se forma sobre la cara anterior del cristalino que también actúa como un espejo convexo. Es la mayor de todas en cuanto a tamaño debido a que el radio de curvatura de la cara anterior del cristalino es mayor que los de la córnea, pero su intensidad luminosa es la más débil debido a varios factores como son:

- El mayor tamaño de la imagen.
- La escasa diferencia entre el índice de refracción del humor acuoso y el del cristalino.
- Una superficie menos lisa que la de la córnea.
- La conformación del cristalino con diferentes índices de refracción.

Durante la acomodación esta imagen se hace más pequeña, ya que disminuye el radio de curvatura, es decir aumenta la curvatura de la cara anterior del cristalino.

La *cuarta imagen* se forma por reflexión sobre la cara posterior del cristalino, que a diferencia de las otras actúa como un espejo cóncavo, por lo que se produce una imagen real e invertida. Su intensidad es mayor que la de la tercera imagen pero su tamaño es menor que el de la primera (superficie anterior de la córnea). Durante la acomodación esta imagen se modifica poco.

En resumen, la imagen de mayor tamaño es la de la superficie anterior del cristalino, luego la de la superficie anterior de la córnea y por último la de la superficie posterior del cristalino. En cuanto a la intensidad luminosa, la imagen más intensa es la primera, luego la cuarta y después la tercera. Durante la acomodación las imágenes corneales no se modifican, muy poco la cuarta imagen y la tercera imagen sufre grandes modificaciones tanto en tamaño como en posición.

Por sus características las imágenes de Purkinje-Sanson sirven para calcular la posición exacta y radio de curvatura de las superficies reflejantes. Tcherning (1.892) con el oftalmofacómetro determinó la posición de las caras del cristalino utilizando para ello la medida de las imágenes de Purkinje.

11.9 DISTRIBUCIÓN DE LOS COMPONENTES OCULARES Y DE LAS AMETROPÍAS

El estado refractivo del ojo está prácticamente determinado por la relación entre cuatro componentes o variables principales e individuales: la potencia de la córnea, la profundidad de la cámara anterior, la potencia de la lente del cristalino y la longitud axial del ojo. En general, las dimensiones de todos estos componentes oculares, al igual que otras medidas del organismo, siguen una distribución normal.

La *potencia de la córnea* tiene unos valores comprendidos entre +39 y +48 D con un valor medio de +42,75 D, y para el 85% de todos los ojos esos valores están entre +41 y +45 D.

La *profundidad de la cámara anterior* oscila entre 2,8 y 4,6 mm con un valor medio de 3,6 mm, y en aproximadamente el 84% de todos los ojos los valores se sitúan entre 3,2 y 4,0 mm.

La *potencia del cristalino* oscila entre 15 y 25 D con una media de 20,35 D, y el 91% de los ojos tienen potencias para esta lente entre +18 y +23 D.

La *longitud axial*, medida desde la superficie anterior de la córnea hasta la foveola, presenta valores comprendidos entre 20 y 29,5 mm con un valor medio alrededor de 24 mm.

Según algunos autores, la distribución de la longitud axial, en el total de la población, no es normal y muestra tanto un exceso sobre el valor medio como un sesgo pronunciado hacia las longitudes largas. Sin embargo, si se eliminan de la muestra los casos de miopía elevada, miopes de más de 6 dioptrías, la distribución de la longitud axial pierde muchas de sus peculiaridades alcanzando una distribución normal. La longitud axial, por lo tanto, no es el factor determinante en la frecuencia de las anomalías de refracción leves y medias, pero sí de las elevadas.

La *Potencia equivalente del ojo* también muestra un patrón de distribución normal con unos valores comprendidos entre +54 y +65 D con una media de +59,63 D. Aproximadamente el 90% de todos los ojos tienen valores de potencia entre +57 y +63 D.

Puesto que los cuatro componentes de la refracción ocular tienen una distribución normal, sería de esperar que las múltiples combinaciones entre ellos dieran lugar a un estado refractivo del ojo que también siguiese una distribución normal. Sin embargo, esto no ocurre y la *distribución de las ametropías* muestra un exceso acusado en los valores centrales de la refracción ocular, es decir, en la región de emetropía entre 0,00 y +2,00 D, tal como se muestra en el histograma de la *Figura 11.14*.

La mayoría de los estudios coinciden en que la hipermetropía es mucho más común que la miopía. En los hombres, aproximadamente el 70% de todos los ojos están dentro del rango de hipermetropía hasta +2,00 D, mientras que el estado refractivo más común para ambos sexos es la hipermetropía inferior a +1,00 D. Por otra parte, la distribución de la miopía está bastante sesgada porque se extiende hacia grados de error mucho más altos que la hipermetropía.

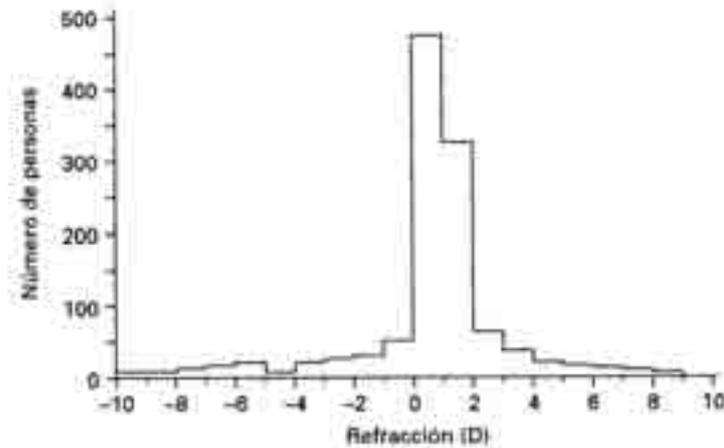


Figura 11.14. Histograma de distribución de la refracción ocular y superpuesto sobre él la curva teórica de una distribución normal (línea discontinua).

11.9.1 Coordinación de los componentes

El hecho de que la frecuencia de emétopes sea muy superior al resto de ametropías indica que los componentes del ojo no varían independientemente unos de otros. Es decir, el ojo es un órgano correlativo y no una mera combinación de componentes libres. Si sólo interviniera el azar no habría tantos ojos emétopes como existen en realidad, por ello durante el desarrollo del ojo hay un proceso regulador en el cual un exceso en un constituyente se equilibra con una modificación en otro.

Esta coordinación de los componentes ópticos para producir una mayor incidencia de emetropía e hipermetropía leve que la esperada se ha denominado *emetropización*. Este proceso de emetropización está programado genética y ambientalmente. Así, en gemelos univitelinos hay una notable concordancia no solo en la refracción total, sino también en el valor de sus componentes aislados, y hay discordancia en gemelos bivitelinos.

La emetropización actúa fundamentalmente durante el crecimiento infantil del ojo. En el recién nacido el ojo tiene una longitud axial de 18 mm que se incrementa hasta los 23 mm a los 3 años. Si este aumento no fuese acompañado por cambios en los otros componentes del sistema refractivo que lo compensasen, tal elongación del ojo debería producir teóricamente alrededor de 15 D de miopía y, sin embargo, durante este periodo, los datos demuestran que alrededor del 75% de los ojos son todavía hipermétropes ya que se considera que el 75% de la población nace hipermetrope de 2,00 a 2,75 D.

Durante el crecimiento del ojo la distancia focal imagen se va ajustando al aumento de la longitud axial. Al principio, este ajuste se consigue con cambios en el dióptrio más potente del ojo, la córnea, cuya curvatura va disminuyendo conforme aumenta la longitud axial. Entre los 6 meses de vida y el año la córnea alcanza casi las dimensiones adultas, junto con la profundidad de la cámara anterior. Después de este periodo, la potencia del cristalino es el componente ocular que más varía para mantener la emetropía durante el crecimiento.

Entre los 3 y 14 años, la longitud axial del ojo aumenta 1 mm más. Otra vez, deberían producirse teóricamente 3D de miopía. Sin embargo, los ojos permanecen próximos a la emetropía, siendo fundamentalmente el cristalino el

factor que compensa el incremento de la longitud axial. Mientras que en el recién nacido los radios de curvatura de la superficie anterior y posterior de la lente del cristalino son 5 y 4 mm respectivamente, en el adulto alcanzan 10 y 6 mm respectivamente. Asimismo, el diámetro ecuatorial y el espesor del cristalino aumentan progresivamente en los primeros años de vida, a la vez que también varía el índice de refracción.

En general, se ha demostrado que tanto la potencia de la córnea como la del cristalino se correlacionan bien con la longitud axial, aunque la correlación para la potencia de la córnea es particularmente alta entre emétopes. Es decir, parece que la córnea juega un papel más importante que el cristalino en la coordinación del sistema óptico del ojo.

La emetropía suele estabilizarse hacia los 7 años, aunque el crecimiento del globo ocular puede continuar hasta los 20 años. Por lo tanto, el periodo más estable del estado refractivo del ojo es entre los 20 y los 40 años, después de que ha cesado su crecimiento. Entre los 40 y los 70 años aumenta la hipermetropía, proceso que se conoce como hipermetropía adquirida o senil. Y en edades muy avanzadas puede haber tendencia a la miopización debido a cambios en el índice del cristalino, causados por una esclerosis nuclear de la lente y debido también a la miosis pupilar que aparece en la senilidad.

BIBLIOGRAFÍA BÁSICA

- *Adler's Physiology of the eye : clinical application.* edited by Paul L. Kaufman, Albert Alm. St. Louis [etc.] : The C.V. Mosby Comp., 2002. 10th. ed.
- Aguilar M. y Mateos F. *Optica Fisiológica Tomo I.* Servicio de Publicaciones U.P.V. Valencia, 1993.
- Atchison David A., Smith George. *Optics of the human eye / Oxford [etc.]* : Butterworth-Heinemann, 2000.
- Duke-Elder, S / revisado por David Abrams. *Duke-Elder refracción: teoría y práctica.* Jims. Barcelona, 1985. 1ª ed.
- Elkington Andrew R., Frank Helena J., Greaney Michael J. *Clinical optics / Oxford [etc.]* : Blackwell Scientific Publications, 1999
- Fannin Troy E., Grosvenor Th. *Clinical Optics.* Boston [etc.] : Butterworth-Heinemann, 1996. 2nd ed.
- Gil del Rio, E. *Óptica Fisiológica Clínica: Refracción.* 5ª ed. Toray. Barcelona, 1984.
- Goss David A, West Roger W. *Introduction to the optics of the eye.* Boston [etc] : Butterworth-Heinemann, cop. 2002
- Le Grand, Y. *Óptica fisiológica: Tomo I, El ojo como instrumento óptico.* Sociedad Española de Optometría y Asociación de amigos de las escuelas de óptica. Madrid, 1991.
- Obstfeld, H. *Optics in vision: foundations of visual optics and associates computation.* 2ª ed. London. Butterworths and Co, 1982.

-
- Pedrotti, Frank L. Pedrotti, S.J. *Optics and vision* / Leno S. Upper Saddle River, NJ : Prentice-Hall, 1998.
 - Pujol Ramo, J. Capilla Perea, P. *Óptica fisiológica. Problemas*. 1ª ed. Ediciones U.P.C. Barcelona, 1993.
 - Rabbetts, R. Bennett and Rabbetts' *Clinical Visual Optics*. 3ª ed. Butterworth. London, 1998.
 - Romero, J. *Apuntes de Óptica Fisiológica*. Universidad de Granada. 1992.
 - Schwartz Steven H. *Geometrical and visual optics : a clinical introduction* / New York [etc.] : McGraw-Hill, cop. 2002.
 - Tunnacliffe, A. H. *Introduction to visual optics*. London : Association of British Dispensing Opticians, 1997. [4th. ed. / reimp.]The association of British dispensing opticians. London, 1993.