

Capítulo 2.

EL OJO

2.1.	El ojo humano como órgano receptor de luz	23
2.2.	Descripción estructural del ojo	23
2.3.	Formación de imágenes	24
2.4.	Curva de sensibilidad del ojo	25
2.5.	Acomodación	26
2.6.	Contraste	26
2.7.	Adaptación	28
2.8.	Deslumbramiento	29

2.1. El ojo humano como órgano receptor de luz

El ojo es el órgano fisiológico del sentido de la vista, mediante el cual se experimentan las sensaciones de luz y color. Para que se realice el proceso de la iluminación, como acción y efecto de iluminar y ver, se requieren tres agentes:

- 1) La fuente productora de luz o radiación luminosa.
- 2) Un objeto a iluminar que necesitamos que sea visible.
- 3) El ojo, que recibe la energía luminosa y la transforma en imágenes que son enviadas al cerebro para su interpretación.

El estudio y descripción de los componentes del ojo, así como el proceso que se realiza desde que la luz le llega y pasa por las vías y centros visuales hasta que es interpretada por el cerebro, nos llevaría al campo de la neurofisiología. Aquí describiremos y expondremos algunos comportamientos y conceptos del sentido de la vista, cuyo conocimiento es indispensable y contribuye a un mejor diseño de las instalaciones de iluminación.

2.2. Descripción estructural del ojo

En la Fig. 1 se representa un corte longitudinal esquemático del ojo humano, en el que se puede apreciar su constitución anatómica.

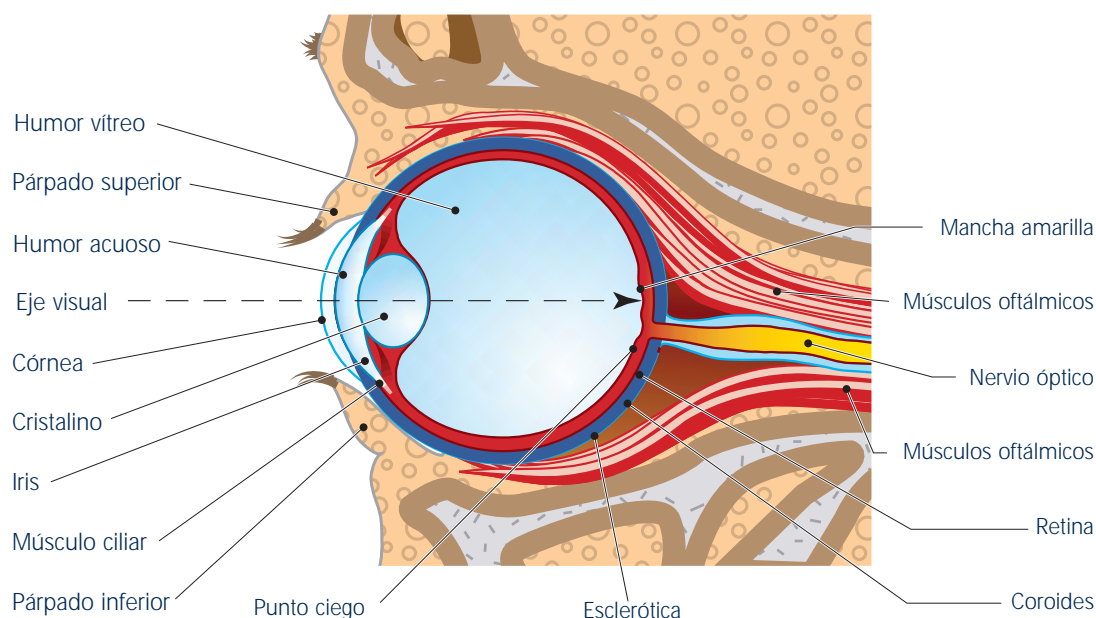


Figura 1. Constitución del ojo humano.

El ojo está constituido principalmente por los siguientes elementos:

- a) **Globo ocular:** Cámara que tiene como función principal la formación de la imagen en la retina.
- b) **Córnea:** Tiene la misión de recibir y transmitir las impresiones visuales y constituye el componente óptico refractor fundamental del ojo.
- c) **Cristalino:** Es una lente biconvexa, transparente e incolora situado tras el iris. Esta membrana elástica cambia su forma para enfocar los objetivos.
- d) **Iris:** Lámina circular situada frente al cristalino y muy pigmentada. Puede contraer la pupila controlando la cantidad de luz que pasa al cristalino.
- e) **Pupila:** Orificio circular situado en el centro del iris y a través del cual pasan los rayos luminosos. La abertura de este orificio la controla el iris y su constricción se llama *miosis* y la dilatación *midriasis*.
- f) **Retina:** Es la película interna posterior del ojo constituida por una membrana nerviosa, expansión del nervio óptico, que tiene la función de recibir y transmitir imágenes o impresiones visuales. Contiene una finísima capa de células fotosensibles, conos y bastones, que divergen del nervio óptico y que están en la parte externa próximas a la capa pigmentada.

- g) **Conos:** Células fotosensibles de la retina o fotorreceptores que se encuentran principalmente en la fóvea. Son muy sensibles a los colores y casi insensibles a la luz. De ahí que cumplan la función de discriminar los detalles finos y la de percibir los colores (Fig. 2).
- h) **Bastones o bastoncillos:** Células fotosensibles de la retina o fotorreceptores que se encuentran sólo fuera de la fóvea y más concentrados en la periferia. Son muy sensibles a la luz y al movimiento, y casi insensibles al color. De ahí que la misión de los bastones sea la de percibir la mayor o menor claridad con que están iluminados los objetos (Fig. 2).
- i) **Mácula:** Mancha amarilla situada en el polo posterior de la retina, sobre el eje óptico, donde se produce la fijación nítida y precisa de detalles y colores. En su centro se encuentra la fóvea, que sólo está formada por conos.
- j) **Punto ciego:** Punto de la retina por donde el nervio óptico conduce las imágenes o sensaciones de luz al cerebro. En este punto no hay fotorreceptores.

Consecuencias prácticas de la función de conos y bastones

Cuando miramos un espacio iluminado con poca luz, por ejemplo, en la penumbra por la noche, la agudeza visual es baja, porque no actúan los conos y no se distinguen los colores ni los detalles, de ahí el famoso refrán de que “de noche todos los gatos son pardos”. A esta visión nocturna se le llama *escotópica* y en ella intervienen esencialmente los bastones que captan con gran sensibilidad la mayor o menor cantidad de luz y el movimiento de los objetos.

Ello justifica que en algunos alumbrados públicos de avenidas, carreteras, y grandes superficies se efectúe el alumbrado con lámparas de vapor de sodio que reproducen mal los colores, pero aportan gran cantidad de luz.

Por el contrario, con luz diurna o cuando el nivel de iluminación se eleva lo suficiente, los objetos se ven con precisión y detalle porque actúan los bastones y principalmente los conos, con lo cual se pueden distinguir los colores. A la luz diurna se le llama visión *fitópica*. En este caso la cantidad de luz exige ir acompañada de calidad, pues sólo la cantidad produciría irritabilidad en los ojos y deslumbramientos muy molestos.

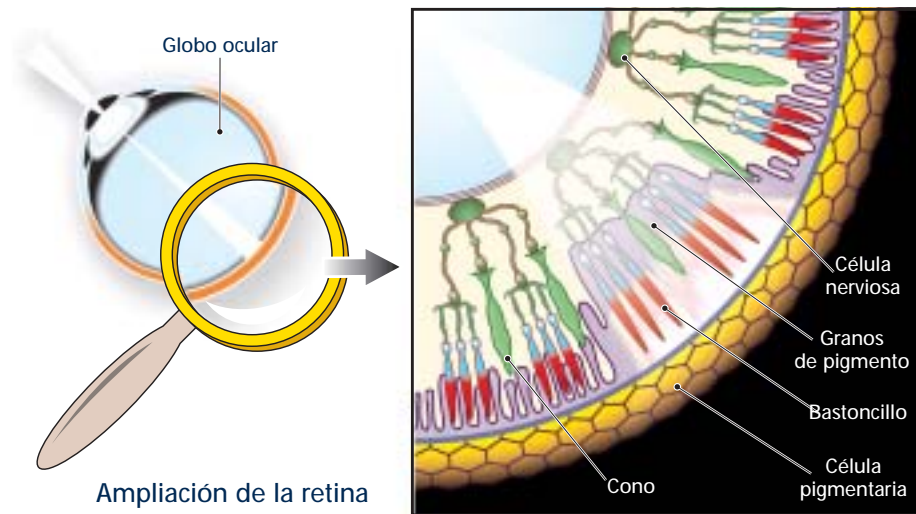


Figura 2. Parte fotosensible del ojo. Actuación de bastoncillos y conos.

2.3. Formación de imágenes

El campo visual del hombre está limitado por un ángulo de unos 130° en sentido vertical y de unos 180° en sentido horizontal. De los objetos iluminados o con luz propia situados en el campo de visual parten rayos luminosos que atraviesan la córnea y el humor acuoso. El iris, mediante la abertura de la pupila, controla la cantidad de luz que se refracta a través del cristalino para incidir finalmente en la retina, donde el pigmento fotosensible de los fotorreceptores la registran en imágenes invertidas y mucho más pequeñas de lo natural, al igual que ocurre en la cámara fotográfica. Una vez recibidas y formadas las imágenes en la retina, a través del nervio óptico, son enviados al cerebro, que se encarga de interpretarlas y rectificar su posición (Fig. 3).

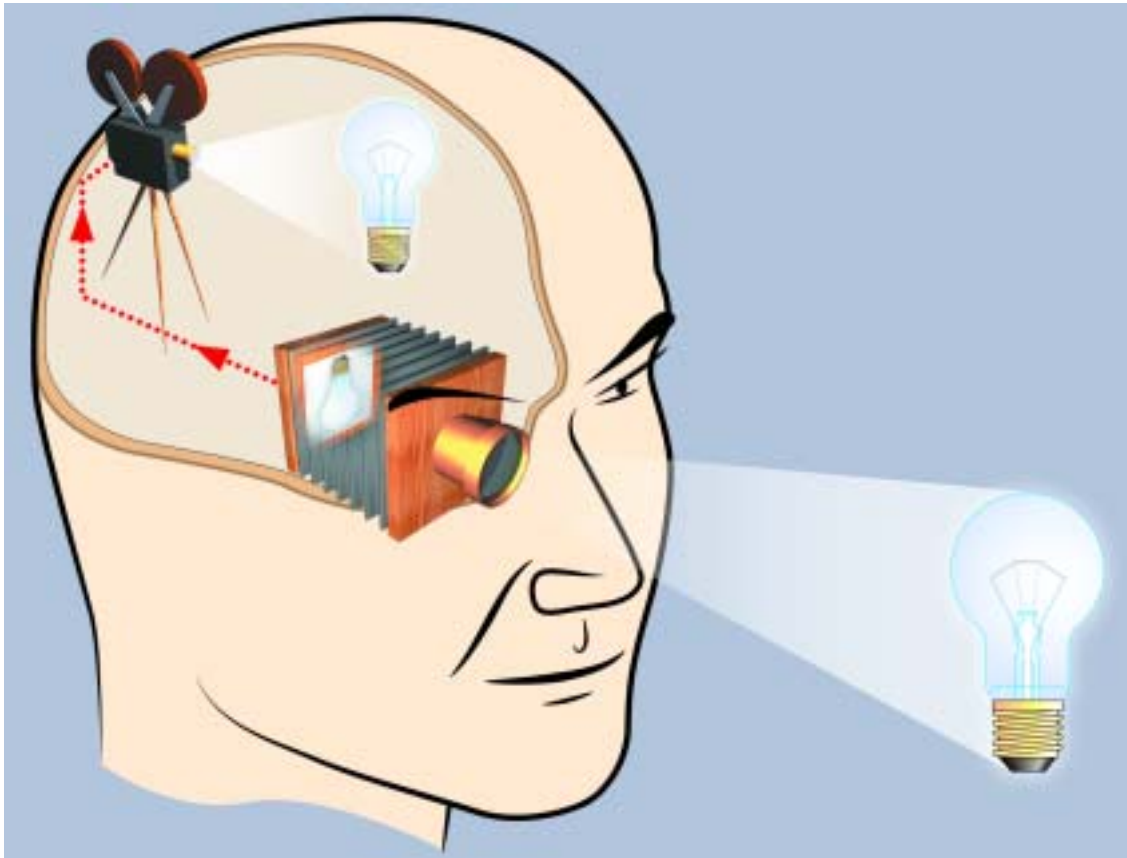


Figura 3. Formación de imagen y su rectificación en el cerebro.

En la tabla siguiente se hace un símil con la cámara fotográfica.

Ojo humano	Cámara fotográfica
Cristalino (controla acomodación)	Objetivo (ajusta distancia entre objetivo y película)
Pupila (controla adaptación)	Diafragma - obturador (adapta exposición y cantidad de luz)
Pigmento de los fotorreceptores	Emulsión de la película
Retina (crea las imágenes)	Película (crea las imágenes)

Tabla 1

2.4. Curva de sensibilidad del ojo

Las radiaciones de longitud de onda comprendidas entre 380 nm. (ultravioleta) y 780 nm. (infrarrojos) son transformadas por el ojo en *luz*. Fuera de esta gama el ojo no ve, es ciego y no percibe nada. Todas las fuentes luminosas tienen su propia radiación o mezcla de ellas comprendida dentro de dichos límites.

La luz blanca del medio día soleado es suma de todas las longitudes de onda del espectro visible. Si las hacemos llegar al ojo independientemente y con la misma energía, se obtiene una curva como la de la Fig. 4, que ha sido elaborada por la C.I.E.* realizando medidas en gran número de personas.

* C.I.E.: Comisión Internacional de Iluminación (Commission Internationale de l'Éclairage).

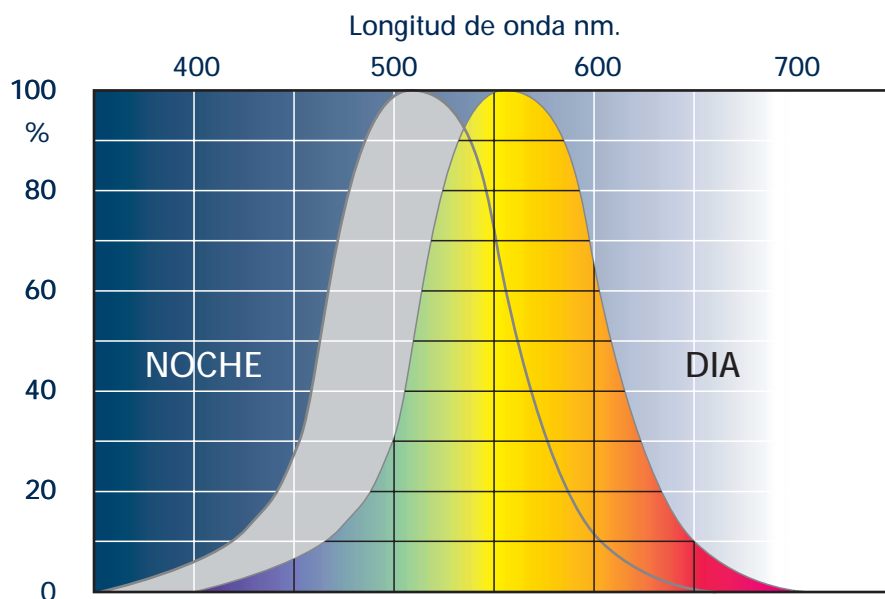


Figura 4. Curva de sensibilidad del ojo a las radiaciones monocromáticas.

En ella se observa que para la luz blanca del día (fotópica), la máxima sensibilidad del ojo corresponde a la longitud de onda de 555 nm. y al color amarillo. La mínima sensibilidad corresponde a los colores rojo y violeta.

De esta forma, las fuentes luminosas cuyas longitudes de onda corresponden al amarillo – verde son las que tienen más eficacia, aunque de peor calidad debido a que tal luz no es apropiada para nuestro ojo, acostumbrado a la luz blanca del Sol. De aquí que en locales con alto nivel de iluminación se realcen los colores naranja y rojo.

En el caso de la luz nocturna (escotópica), el máximo de sensibilidad se desplaza hacia longitudes de onda menores (efecto *Purkinje*) y, por consiguiente, las radiaciones de menor longitud de onda (azul – violeta) producen mayor intensidad de sensación con baja iluminación. Este efecto es de gran importancia cuando se proyectan locales con bajo nivel de iluminación en los que se ven mejor los colores azul y violeta.

2.5. Acomodación

Es la capacidad que tiene el ojo para ajustarse automáticamente a las diferentes distancias de los objetos, y obtener de esta forma imágenes nítidas en la retina. Este ajuste se efectúa variando la curvatura del cristalino y con ello la distancia focal por la contracción o distensión de los músculos ciliares. Si el objetivo se encuentra próximo al ojo, la curvatura del cristalino se hace mayor que cuando está lejos. En la máquina fotográfica el ajuste se hace variando la distancia entre el objetivo y la película sensible.

La acomodación o enfoque es más fácil con altas luminancias* (iluminaciones) que obligan a una adaptación de la pupila o modificación del diafragma en sentido de cierre. El resultado común de esta acción es el aumento de la profundidad del campo, o lo que es lo mismo, visión nítida de objetos a diferente distancia del ojo o la cámara.

La capacidad de acomodación del ojo disminuye con la edad a consecuencia del endurecimiento del cristalino.

2.6. Contraste

Todos los objetos son percibidos por los contrastes de color y de luminancia que presentan las distintas partes de su superficie entre sí y en relación al fondo en que aparece el objeto.

* Luminancia: Efecto de luminosidad que produce una superficie en la retina del ojo, tanto si procede de una fuente primaria de luz como si procede de una superficie que refleja.

Para niveles de iluminación suficientemente elevados, el ojo normal es sensible a los colores, mientras que para bajos niveles de iluminación los objetos son percibidos fundamentalmente por el contraste de luminancias que presentan con relación al fondo. La diferencia de luminancia entre objeto que se observa y su espacio inmediato, es lo que se conoce por *contraste*.

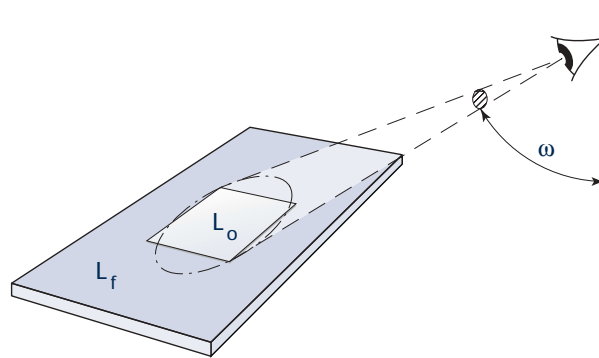


Figura 5

En la Fig. 5 la superficie del objeto tiene una luminancia " L_o " y la superficie de fondo una luminancia " L_f ," por tanto se llama contraste " K " a la diferencia de estas dos luminancias, divididas por la de fondo, es decir:

$$K = \frac{L_o - L_f}{L_f}$$

" K " es, por tanto, un valor relativo entre luminancias.

Como hemos comentado, la visibilidad de un objeto situado sobre un fondo, depende de la diferencia de luminancias entre el objeto y el fondo. Un objeto claro sobre fondo oscuro, su contraste será positivo (valores entre 0 e infinito), en cambio un objeto más oscuro que su fondo se verá en silueta y su contraste será negativo, variando entre 0 y (-1).

El contraste K puede ser positivo o negativo:

Si $L_o > L_f$ $K > 0$ contraste positivo (objeto más claro que el fondo).

Si $L_o < L_f$ $K < 0$ contraste negativo (objeto más oscuro que el fondo).

El contraste K puede adquirir los siguientes valores:

Contraste positivo (objeto claro) $0 < K < \infty$

Contraste negativo (objeto oscuro) $-1 < K < 0$

En los ejemplos de la Fig. 6, a) presenta un contraste fácil de distinguir, mientras que b) y c) ofrecen mayor dificultad.

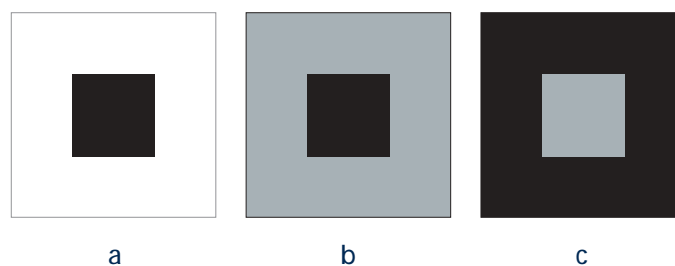


Figura 6

También existe un contraste de colores. En la Tabla 2 podemos ver unos ejemplos.

Color del objeto	Color del fondo
Negro	Amarillo
Verde	Blanco
Rojo	Blanco
Azul	Blanco
Blanco	Azul
Negro	Blanco
Amarillo	Negro
Blanco	Rojo
Blanco	Verde
Blanco	Negro

Tabla 2. Contrastes de colores.

Sensibilidad al contraste

Se trata de un concepto derivado del anterior que equivale al mínimo contraste de luminancias que puede ser percibido por el ojo humano. Matemáticamente sería el inverso del contraste.

$$G = \frac{L_f}{L_o - L_f} = \frac{1}{K}$$

Por consiguiente, la mayor sensibilidad a los contrastes que pueden lograrse es aproximadamente:

$$G = \frac{1}{0.01} = 100$$

Sin embargo, en las condiciones encontradas normalmente en la práctica, la sensibilidad a los contrastes es bastante más pequeña por las causas antes expuestas.

2.7. Adaptación

Es la capacidad que tiene el ojo para ajustarse automáticamente a las diferentes iluminaciones de los objetos. Consiste en el ajuste del tamaño de la pupila para que la luminancia proyectada en la retina sea de un valor tolerable por las células sensibles. En su símil con la cámara fotográfica, sería la mayor o menor apertura del diafragma.

Si la iluminación es muy intensa, la pupila se contrae reduciendo la luz que llega al cristalino, y si es escasa, se dilata para captarla en mayor cantidad.

En iluminaciones de valores muy altos, la pupila se reduce a un diámetro de aproximadamente 2 mm., y en iluminaciones muy bajas, se abre hasta aproximadamente 8 mm.

Cuando se pasa de un local con mucha iluminación a otro completamente a oscuras, el ojo se ve sometido a un proceso de adaptación para cuyo ajuste total necesita unos 30 minutos; mientras que por el contrario, cuando se pasa de un local a oscuras a otro con mucha iluminación, dicho periodo es de unos segundos (Fig. 7).

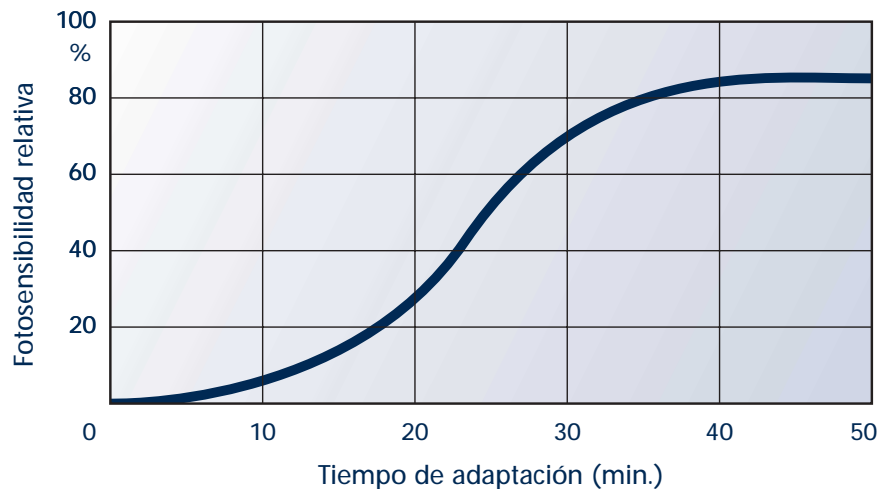


Figura 7. Curva de fotosensibilidad relativa del ojo respecto al tiempo de adaptación.

2.8. Deslumbramiento

Es un fenómeno de la visión que produce molestia o disminución en la capacidad para distinguir objetos, o ambas cosas a la vez, debido a una inadecuada distribución o escalonamiento de luminancias, o como consecuencia de contrastes excesivos en el espacio o en el tiempo.

Este fenómeno actúa sobre la retina del ojo en la cual produce una enérgica reacción fotoquímica, insensibilizándola durante un cierto tiempo, transcurrido el cual vuelve a recuperarse.

Los efectos que origina el deslumbramiento pueden ser de tipo psicológico (molesto) o de tipo fisiológico (perturbador). En cuanto a la forma de producirse puede ser directo como el proveniente de fuentes luminosas (lámparas, luminarias o ventanas), que se encuentren situadas dentro del campo visual, o reflejado por superficies de gran reflectancia, especialmente superficies especulares como las del metal pulido.

Las fuentes luminosas producen generalmente un deslumbramiento perturbador; éste es proporcional a la iluminación producida por la fuente de luz sobre la pupila del ojo, así como a un factor dependiente del ángulo "q" que forman la línea recta "R" que une el ojo con el foco "F" y el plano horizontal "H" que pasa por el ojo en la posición de trabajo. En la Fig. 8 se indican los distintos deslumbramientos en función de este ángulo, habiéndose tomado como admisible un valor mínimo de 30°.

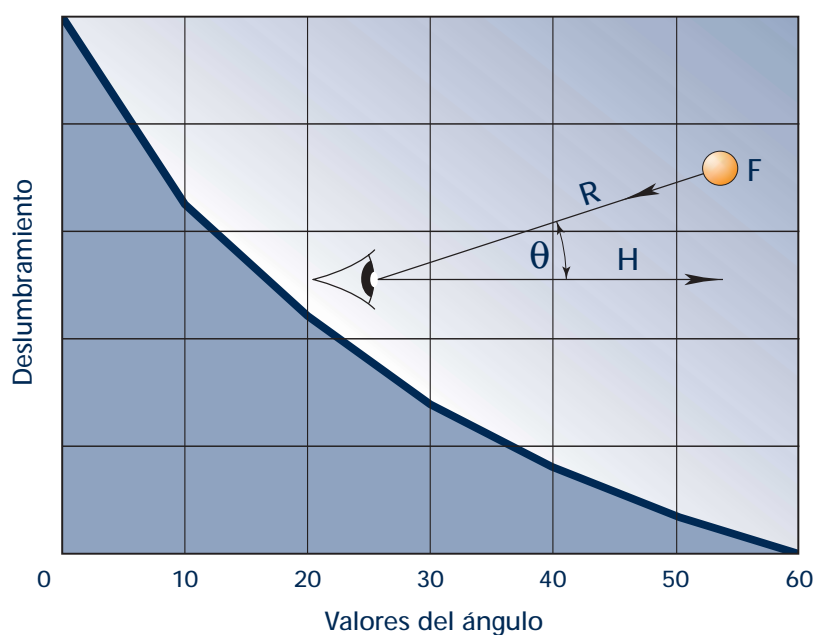


Figura 8. Deslumbramientos en función del ángulo q.

Las superficies que no sean completamente mates dan lugar, por reflexión de la luz, a imágenes más o menos netas de los focos luminosos. Incluso si su luminancia no es excesiva, estas imágenes son casi siempre molestas cuando se encuentran en el campo visual y, especialmente, en la región central de este campo.

Según lo expuesto, se evitará en lo posible toda clase de superficies pulidas innecesarias (cristales sobre las mesas, etc.). En el caso que se utilicen superficies semi-pulidas (encerados) se iluminarán por medio de fuentes con la menor luminancia posible y cuya posición se calcule en función de los reflejos que puedan obtenerse (filtros, rejillas, difusores, etc.).

En casos especiales, las imágenes que proporcionan reflexión podrán ser útiles (visión por efecto de silueta, examen de defectos en superficies pulidas, composición de imprenta, etc.).

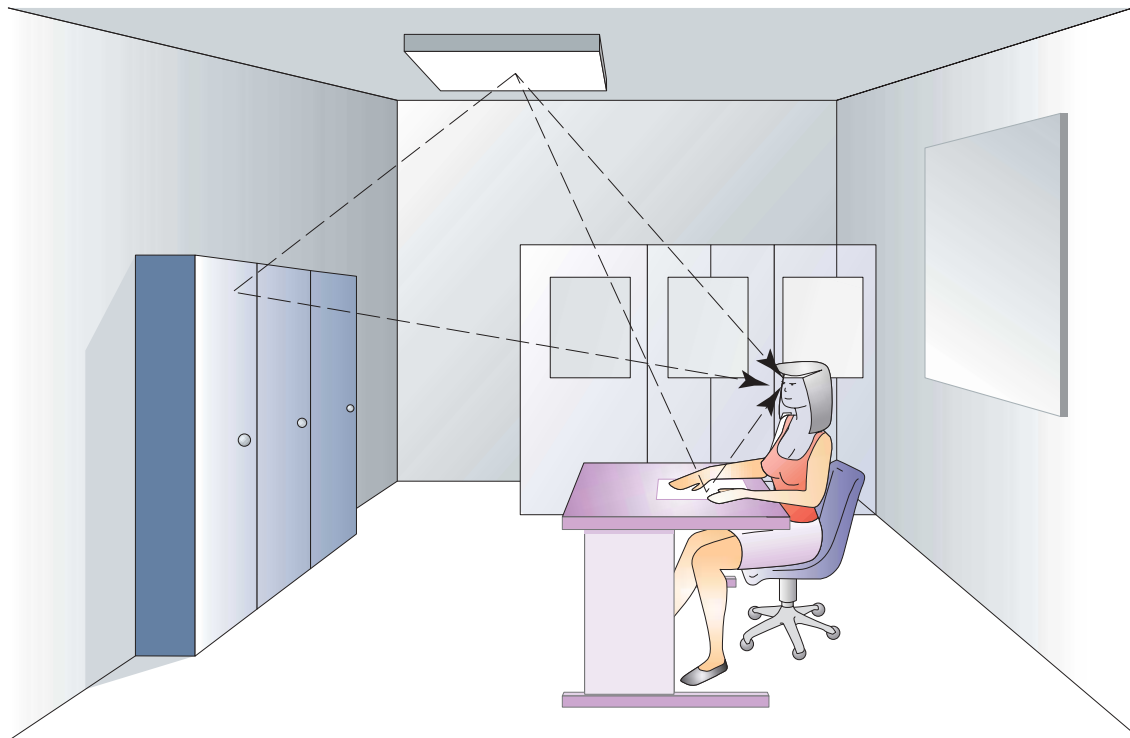


Figura 9. Superficies que reflejan la luz.