

L'ULL

Anatomia de l'ull

L'ull és l'òrgan que detecta la llum i és la base del sentit de la vista. La seva funció consisteix, principalment, en transformar l'energia lumínica en senyals elèctrics que són enviats al cervell a través del nervi òptic.

La figura 1 mostra els principals elements que configuren l'ull. La forma de l'ull és aproximadament esfèrica i està envoltat per una membrana anomenada escleròtica que es torna transparent a la part anterior per formar la còrnia. Si analitzem els elements d'esquerra a dreta, després de la còrnia hi ha un medi líquid anomenat humor aquós. L'iris és el diafragma d'obertura DA de l'ull. L'iris dona el color a l'ull i controla de forma automàtica el diàmetre de la pupil·la per regular la quantitat de llum que hi passa. El seu diàmetre varia entre 2 i 8 mm. El cristal·lí és una lent biològica de potència variable. La variació de potència s'aconsegueix mitjançant la contracció i distensió del múscle ciliar. Darrera el cristal·lí es troba un medi líquid anomenat humor aquós.

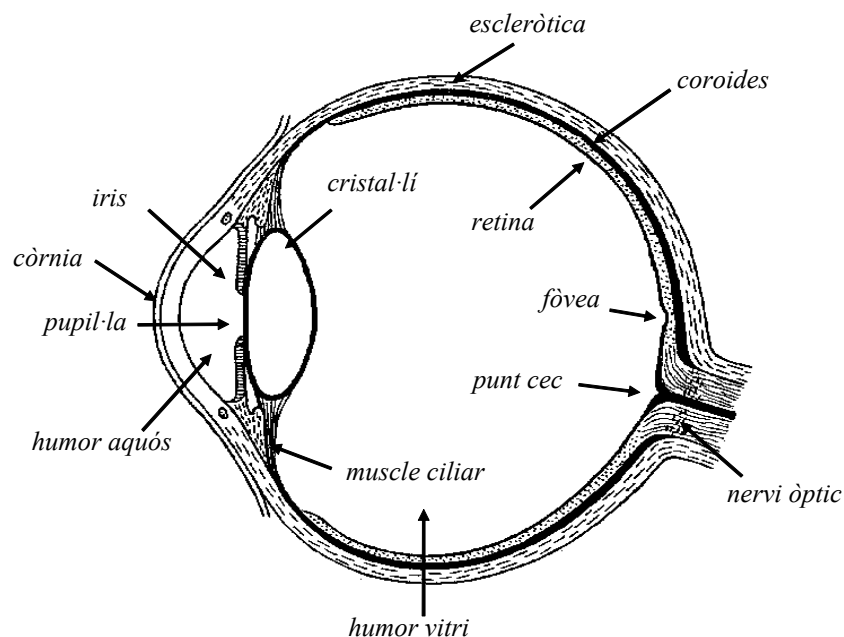


Figura 1. Elements de l'ull humà

La còrnia, juntament amb el cristal·lí, són les dues lents encarregades de formar les imatges damunt de la retina. La retina és un teixit que conté unes petites estructures anomenades cons (sensibles al color) i bastons (sensibles a la llum feble). La zona de la retina on hi ha la màxima resolució es troba en la fòvea. És una petita regió d'aproximadament 0,3 mm de diàmetre on només s'hi troben cons. A mida que s'allunya de la fòvea el nombre de cons disminueix i el de bastons augmenta.

Entre l'escleròtica i la retina hi ha la coroides. Aquesta membrana té com a funció principal mantenir constant la temperatura de la càmera i nodrir algunes estructures del globus ocular.

El nervi òptic porta els senyals nerviosos de l'ull cap al cervell que és qui els processa. El lloc de la retina per on surt el nervi òptic no conté cèl·lules receptores i és l'anomenat punt cec. Quan la imatge es projecta en aquest punt no es veu.

En una primer aproximació l'ull es pot considerar com una càmera fotogràfica on el sistema format per la còrnia i el cristal·lí constitueixen l'objectiu, l'iris el *DA* i la retina el sensor.

Acomodació

En el procés de la formació de la imatge sobre la retina la còrnia actua com una lent de potència fixa i el cristal·lí com una lent de potència variable. D'aquesta manera, en variar la potència del cristal·lí l'ull pot enfocar objectes situats a diferents distàncies. Per augmentar la potència del cristal·lí els músculs ciliars pressionen de manera que modifiquen el gruix de la lent i la curvatura de les seves cares. Per enfocar un objecte que està proper els músculs ciliars es contrauen (Figura 2(a)). Per contra si l'objecte està distant els músculs ciliars es relaxen (Figura 2(b)). La variació de potència del cristal·lí per acció dels músculs ciliars s'anomena acomodació.

S'anomena punt remot *PR* la distància màxima a la qual pot estar situat un objecte perquè una persona el distingeixi clarament. S'anomena punt proper *PP* la distància mínima. L'acomodació és mínima en el *PR* i màxima en el *PP*.

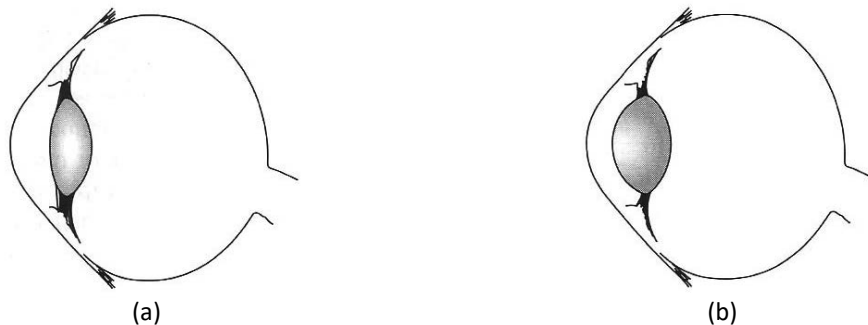


Figura 2. (a) Ull relaxat o mirant al punt remot. (b) Ull acomodant o mirant a un punt més proper que el punt remot.

L'ull emmetrop és aquell que enfoca en la retina els objectes situats a l'infinit sense necessitat d'acomodació. Això vol dir que, per aquest ull, el focus imatge està en la retina i el *PR* en l'infinit.

El *PP* s'allunya progressivament de l'ull en el transcurs dels anys. La causa és la pèrdua de flexibilitat del muscle ciliar que fa que el cristal·lí perdi potència d'acomodació. S'agafa com a distància estàndard de l'ull al *PP* el valor de 250 mm tot i que els nens el solen tenir a 100 mm i les persones majors de 40 anys més enllà de 400 mm. L'allunyament del punt proper amb l'edat s'anomena presbícia.

Siguin *k* i *b* les distàncies de l'ull al *PR* i *PP* respectivament (Figura 3).

Es defineix el rang d'acomodació *RA* com:

$$RA = b - k \quad (1)$$

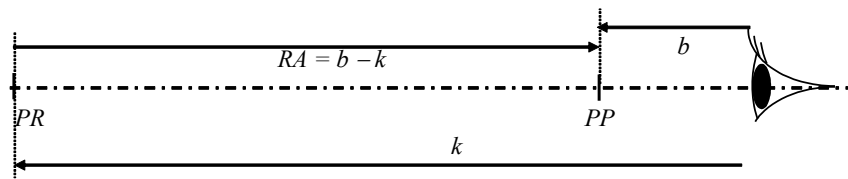


Figura 3. Rang d'acomodació de l'ull.

Es defineix la refracció ocular, K , com la inversa de k .

$$K = \frac{1}{k}. \quad (2)$$

Es defineix la vergència del PP, B , com la inversa de b .

$$B = \frac{1}{b}. \quad (3)$$

Es defineix l'amplitud d'acomodació, A , com:

$$A = K - B = \frac{1}{k} - \frac{1}{b}. \quad (4)$$

L'amplitud d'acomodació s'expressa en diòptries sempre que k i b s'expressin en metres.

Model d'ull reduït

Les propietats òptiques de l'ull es representen mitjançant diferents models d'ull. El model d'ull reduït, que és el que s'utilitza en aquest capítol, és el més senzill de tots. En aquest model l'ull concentra tota la potència refractiva en un únic element. Aquest pot ser un dioptrè esfèric convex (Figura 4(a)) o la lent prima equivalent a aquest dioptrè (Figura 4(b)).

El model de dioptrè esfèric estableix l'ull com un dioptrè convex envoltat de dos medis d'índexs $n = 1,000$ i $n' = 1,333$ respectivament. La separació entre el vèrtex V del dioptrè i la retina R val $VR = 22,22$ mm.

La lent prima equivalent representa l'ull per una lent prima positiva envoltada d'aire ($n = 1,000$ i $n' = 1,000$). En aquest model la distància VR' entre la lent i la retina val:

$$VR' = \frac{VR}{n'} = \frac{22,22}{1,333} = 16,67 = \frac{1000}{60} \text{ mm}. \quad (5)$$

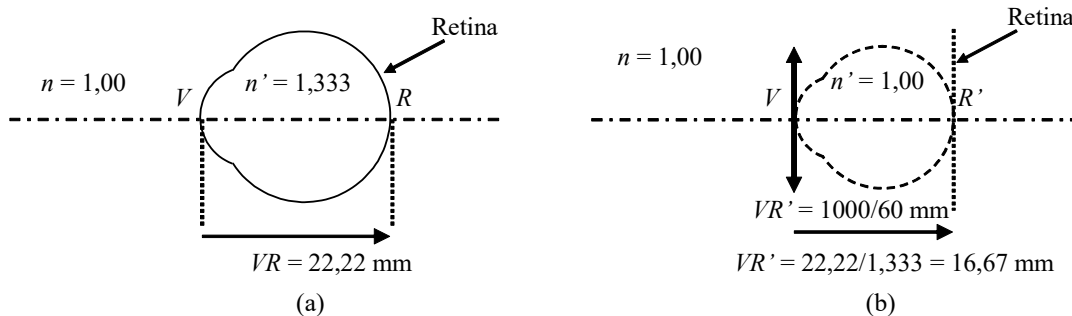


Figura 4. Esquema d'ull emmetrop reduït mitjançant: (a) Un dioptrè esfèric. (b) Una lent prima.

S'ha de tenir en compte que perquè l'ull vegi la imatge enfocada aquesta s'ha de formar damunt de la retina. Si considerem la lent prima associada a l'ull reduït $a' = VR' = \frac{1000}{60}$ mm i aquest valor es mantindrà sempre fix.

La relació de conjugació entre l'objecte i la imatge vindrà donada per:

$$-\frac{1}{a} + \frac{1}{a'} = \frac{1}{f'} = P' \quad (6)$$

La figura 5 mostra que la potència de l'ull disminueix en allunyar-se de l'objecte i pren el seu valor mínim quan l'objecte es troba a l'infinit.

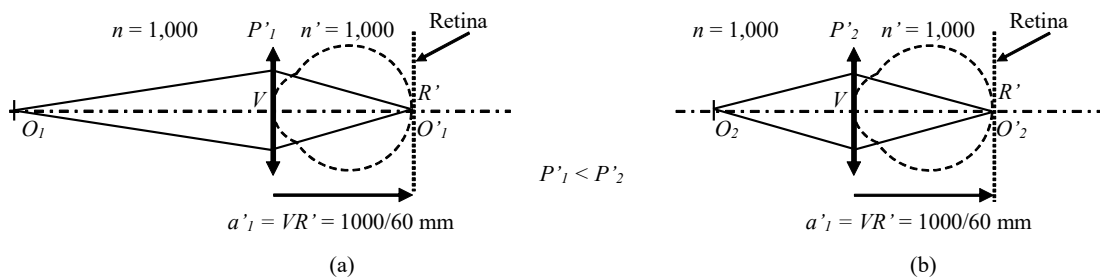


Figura 5. Esquema d'ull emmetrop reduït mitjançant: (a) Un dioptre esfèric. (b) Una lent prima.

Quan un ull emmetrop mira un objecte situat en el seu PR ($a = \infty$) la focal de l'ull prendrà el valor màxim i la potència el valor mínim. De l'equació (6):

$$-\frac{1}{\infty} + \frac{1}{16,67} = \frac{1}{f'_{\max}} = P'_{\min} \quad (7)$$

El que significa que $f'_{\max} = 1000/60 = 16,67$ mm i que $P'_{\min} = 60,00$ D.

Si aquest mateix ull té el PP a la distància $a' = -250$ mm la seva focal prendrà el valor mínim i la seva potència serà la màxima. De l'equació (6):

$$-\frac{1}{-250} + \frac{1}{16,67} = \frac{1}{f'_{\min}} = P'_{\max} \quad (8)$$

El que significa que $f'_{\min} = 1000/64 = 15,62$ mm i que $P'_{\max} = 64,00$ D.

Per un observador emmetrop el rang de valors de la focal i de la potència varia com:

$$\begin{aligned} 15,62 \text{ mm} &\leq f' \leq 16,67 \text{ mm} \\ 64 \text{ D} &\geq P' \geq 60 \text{ D} \end{aligned} \quad (9)$$

De l'equació (4) s'obté que l'amplitud d'acomodació en aquest cas és $A = 4$ D, el que significa que A també es pot obtenir com:

$$A = K - B = P'_{\max} - P'_{\min} \quad (10)$$

Ametropies

Ametropia: Del grec *a-metros* (sense mesura). És un defecte òptic causat per un error de refracció que produeix un desenfocament de la imatge en la retina. Les principals ametropies són: la **miopia**, la **hipermetropia** i l'**astigmatisme**.

Les ametropies poden ser axials o refractives.

En les ametropies axials el defecte està en la longitud axial del globus ocular, o distància entre la còrnia i la retina.

En ametropies refractives el defecte està en la potència del sistema òptic ja sigui en la còrnia o en el cristal·lí.

Miopia: És l'ametropia en la qual els raigs procedents de l'infinít focalitzen davant de la retina (Figura 6).

Aquest defecte pot ser degut a una longitud axial excessiva o a un excés de potència. Sense pèrdua de generalitat considerarem que aquesta ametropia es deguda a un excés de potència del sistema òptic que configura l'ull.

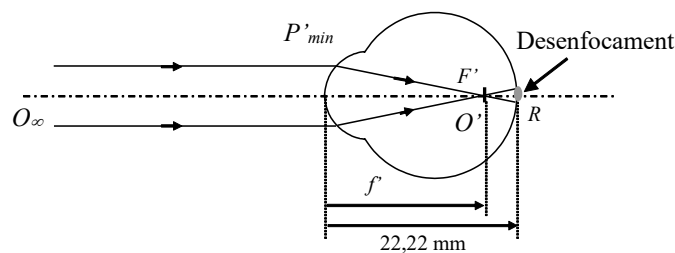


Figura 6. Ull miop formant la imatge d'un objecte situat a l'infinít.

La potència de l'ull miop és més gran que la de l'ull emmetrop. D'aquesta manera la imatge d'un punt objecte situat a l'infinít es forma davant de la retina, apareixent en aquesta una taca de desenfocament (Figura 6).

Per trobar el PR en un ull miop es buscarà el conjugat objecte del punt R a través de l'ull. A causa del excés de potència de l'ull miop el PR està situat davant de l'ull a una distància k ($k < 0$) (Figura 7(a)).

Degut també a l'excés de potència el PP d'un ull miop està situat a la distància b ($b < 0$) més a prop de l'ull que en el cas de l'ull emmetrop (Figura 7(b)).

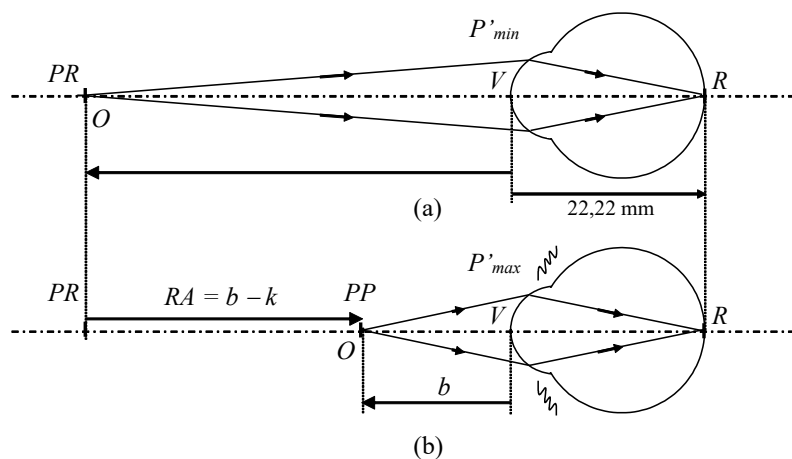


Figura 7. Ull miop formant la imatge de: (a) El seu PR (sense acomodar). (b) El seu PP (amb la màxima acomodació).

Al subjecte que pateix miopia també se l'anomena curt de vista ja que només pot veure els objectes de forma nítida quan es troben a prop d'ell.

Hipermetropia: Es la ametropia en la qual els raigs procedents de l'infinit focalitzen darrera de la retina quan l'ull no acomoda (Figura 8).

Aquest defecte pot ser degut a una longitud axial massa curta o a un defecte de potència. Sense pèrdua de generalitat considerarem que aquesta ametropia es deguda a un defecte de potència del sistema òptic que configura l'ull.

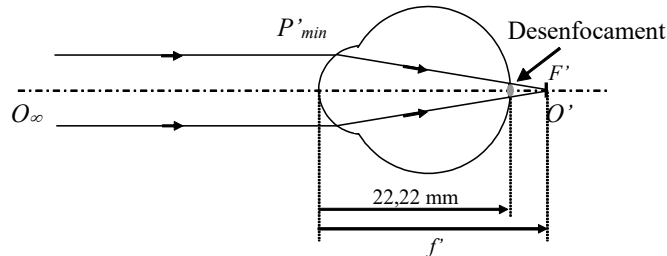


Figura 8. Ull hipermetrop sense acomodar formant la imatge d'un objecte situat a l'infinit.

La potència de l'ull hipermetrop és menor que la de l'ull emmetrop. La imatge d'un punt objecte situat a l'infinit es forma darrera de la retina, apareixent en aquesta una taca (desenfocament).

El punt remot, PR , és el conjugat objecte del punt R a través de l'ull. A causa del defecte de potència de l'ull hipermetrop el PR està situat darrera de l'ull (Figura 9(a)) a una distància k ($k > 0$) de manera que punt remot PR és virtual.

Així mateix, degut també al defecte de potència el PP està situat a la distància b ($b < 0$) més lluny de l'ull que en el cas de l'ull emmetrop (Figura 9(b)). En alguns casos, fins i tot, la distància b pot ser positiva.

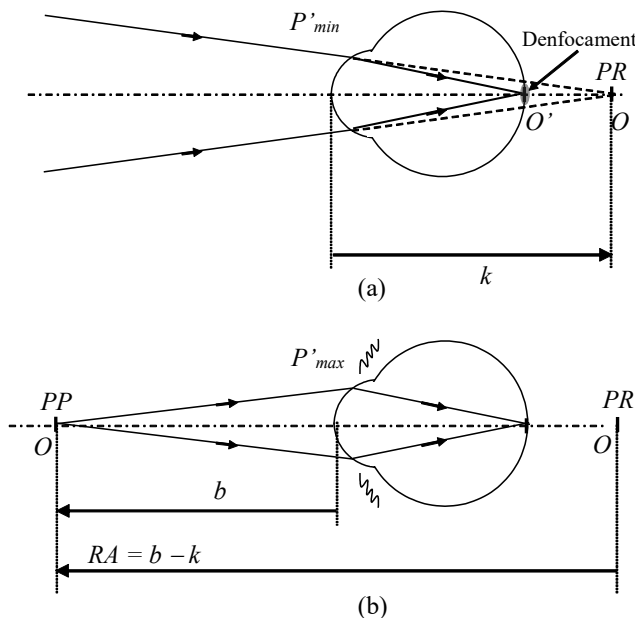


Figura 9. Ull hipermetrop formant la imatge de: (a) El seu PR (sense acomodar). (b) El seu PP (amb la màxima acomodació).

Al subjecte que pateix hipermetropia també se l'anomena com a llarg de vista ja que només pot veure els objectes de forma nítida quan es troben lluny d'ell.

A manera de resum les figures 10, 11 i 12 mostrem esquemàticament els estats refractius de l'ull així com els diferents rangs d'acomodació.

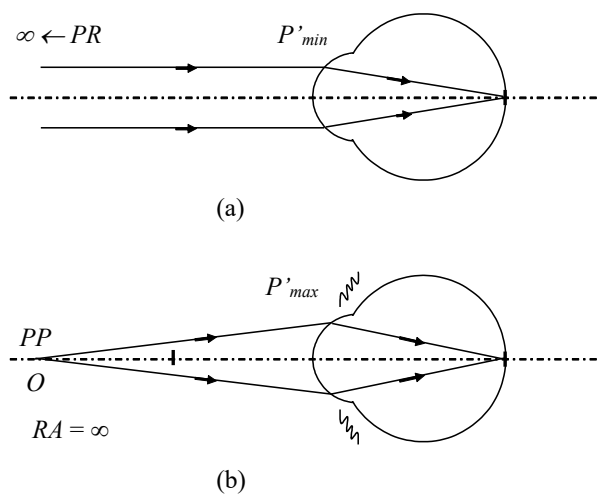


Figura 10. Ull emmetrop. (a) Sense acomodar mirant a l'infinit (P'_{min}). (b) Acomodant mirant al PP (P'_{max}).

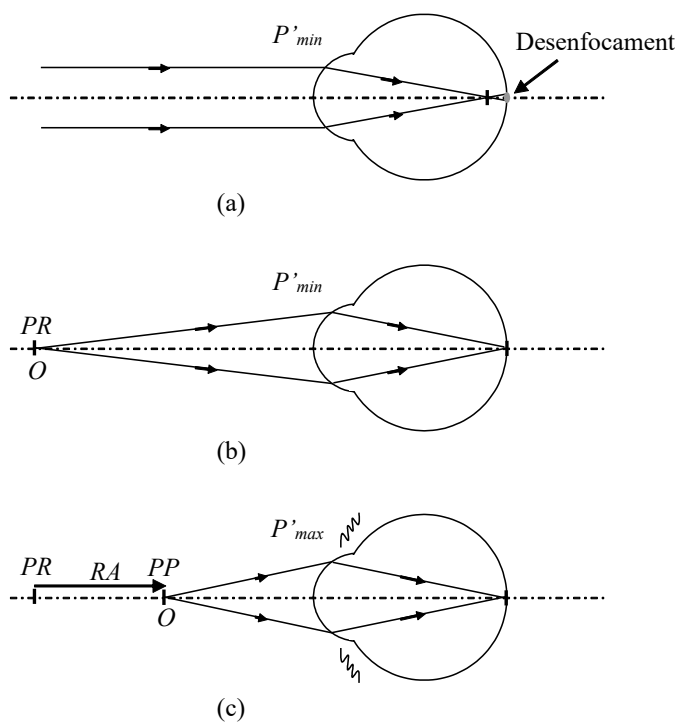


Figura 11. Ull miop. (a) Sense acomodar mirant a l'infinit (P'_{min}). (b) Sense acomodar mirant al PR (P'_{min}).
 c) Acomodant mirant al PP (P'_{max}).

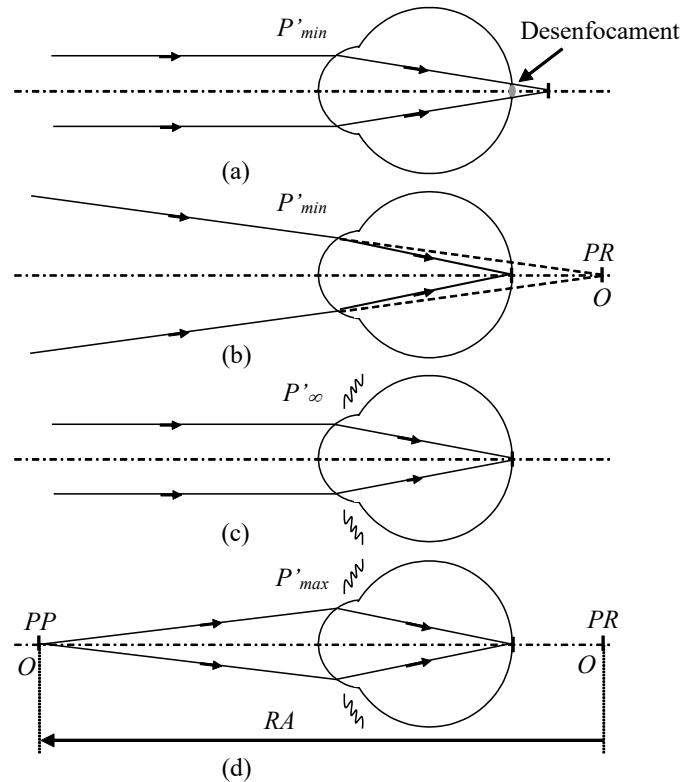


Figura 12. Ull hipermetrop. (a) Sense acomodar mirant a l'infinit (P'_{min}). (b) Sense acomodar mirant al PR (P'_{min}). (c) Acomodant mirant a l'infinit (P'_{∞}). (d) Acomodant mirant al PP (P'_{max}).

La figura 13 mostra el RA pels ulls emmetrop i hipermetrop.

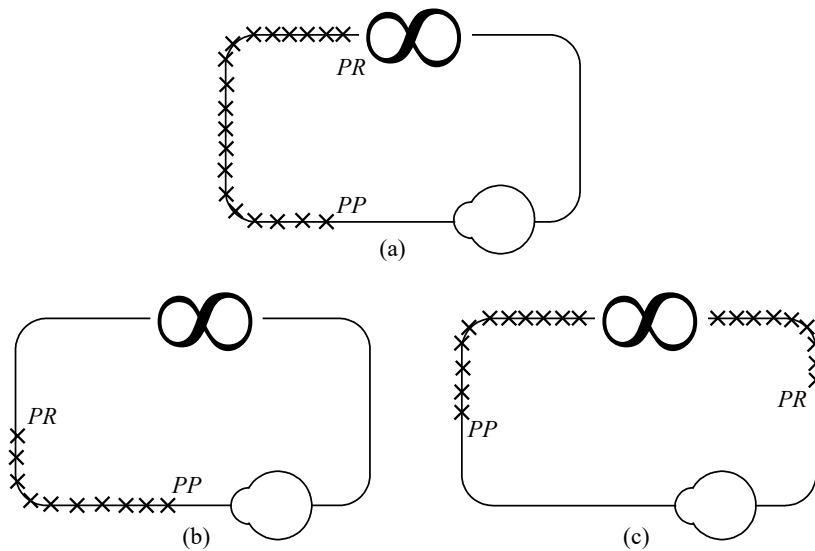


Figura 13. RA en: a) Ull emmetrop. b) Ull miop. c) Ull hipermetrop.

Astigmatisme: Aquesta ametropia, causada per la falta de simetria en la superfície de la còrnia, produeix una refracció diferent entre dos meridians oculars. És a dir, la potència en dos meridians és diferent. (Figura 14).

Encara que l'astigmatisme pot presentar-se com un defecte aïllat, en la majoria dels casos es combina amb la miopia o la hipermetropia.

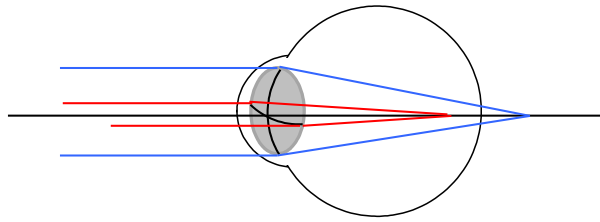


Figura 14. Ull astigmàtic.

Dispersió cromàtica en l'ull

Els medis que configuren l'ull són dispersius de manera que al refractar-se la llum blanca es dispersa en els seus colors apareixent l'aberració cromàtica. A l'igual que en el cas d'un prisma els raigs que menys es desvien són els de color vermell mentre que els que més es desvien són els de color blau.

La figura 15 mostra la trajectòria dels raigs vermell (R), verd (G) i blau (B) pel cas d'un observador emmetrop. És evident que si s'enfoca el raig de color verd els raigs de color vermell i blau queden desenfocats en la retina.

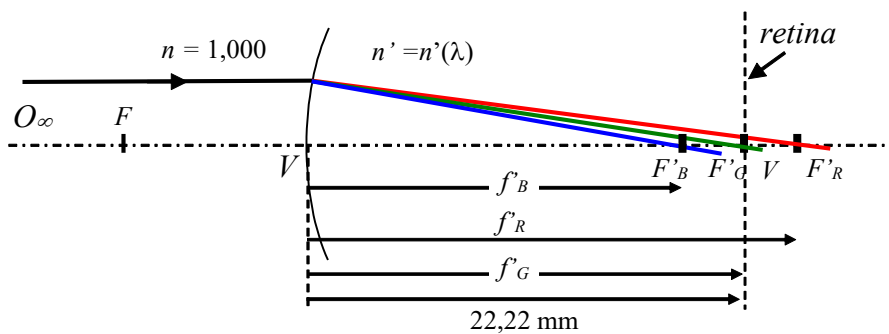


Figura 15. Ull emmetrop sense acomodar i dispersió cromàtica.

Considerem només els raigs de color vermell i verd. La dispersió cromàtica en un ull miop sense acomodar serà la que es mostra en la figura 16. A la retina els objectes de color vermell quedaran millor enfocats que els de color verd ja que la taca de desenfocament serà més petita pel color vermell que pel color verd.

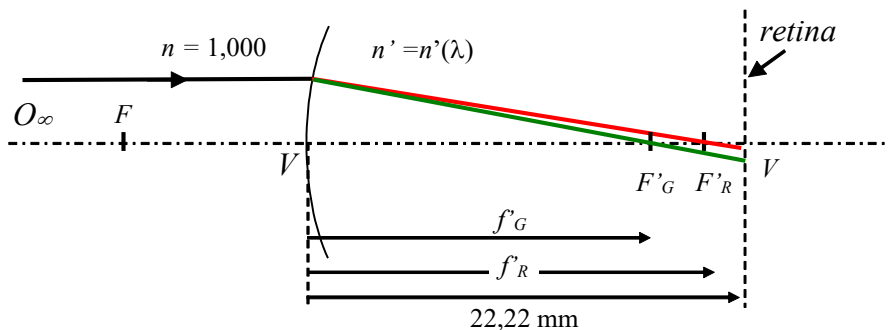


Figura 16. Ull miop sense acomodar i dispersió cromàtica.

La figura 17 mostra la dispersió cromàtica en un ull hipermetrop sense acomodar. En aquest cas els objectes de color verd quedaran millor enfocats que els de color vermell.

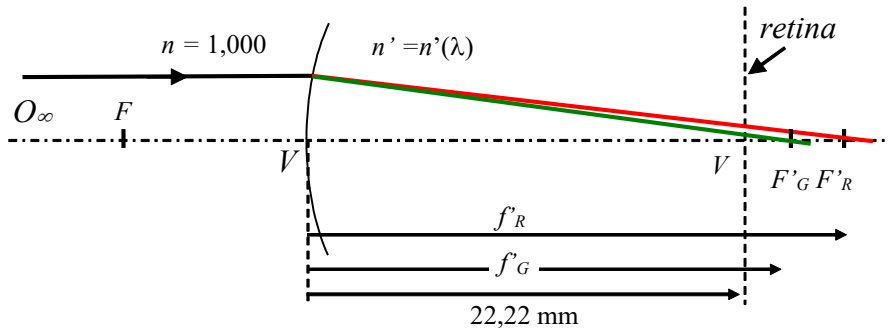


Figura 17. Ull hipermetrop sense acomodar i dispersió cromàtica.

Tenint en compte la dispersió cromàtica de l'ull s'ha dissenyat el test vermell-verd (Figura 18). Quan un observador miop observa aquest test veurà més ben enfocades les lletres vermelles que les verdes. Si l'observador és hipermetrop serà al revés.

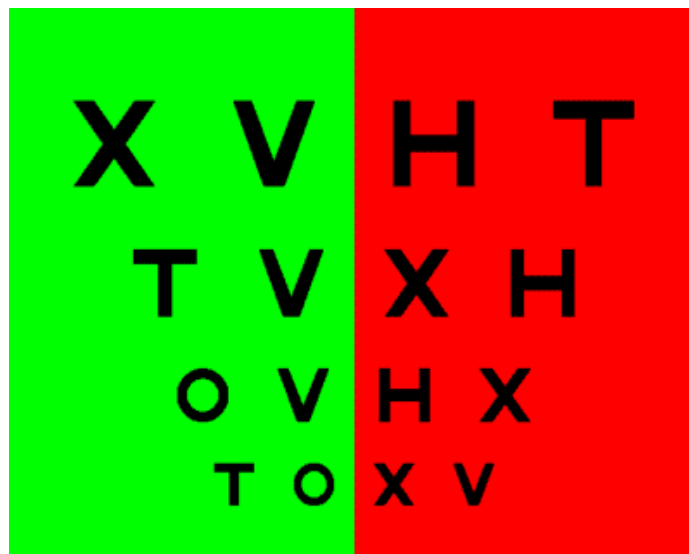


Figura 18. Test vermell-verd.

Correcció de les ametropies

Les ametropies es corregeixen mitjançant un sistema compensador o mitjançant la cirurgia refractiva.

Correcció de la miopia i la hipermetropia mitjançant un sistema compensador.

La miopia i la hipermetropia es poden compensar mitjançant lents oftàlmiques o lentilles. En ambdós casos es tracta d'acoblar una lent a la part externa de l'ull. Per la seva simplicitat considerarem la compensació mitjançant lents oftàlmiques.

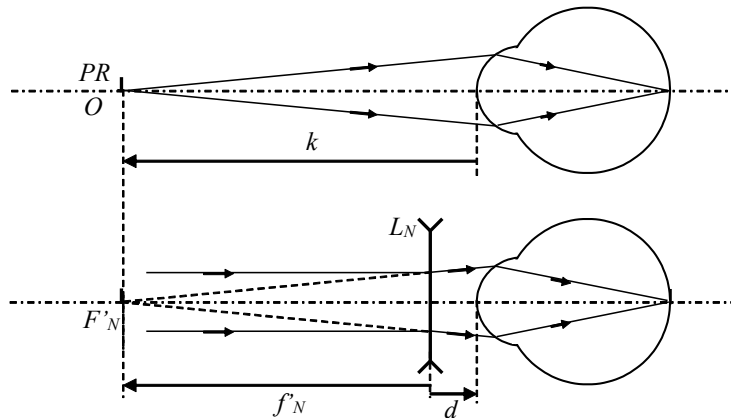


Figura 19. Correcció de la miopia amb una lent prima negativa.

En el cas de la miopia l'excés de potència de l'ull es corregeix mitjançant una lent neutralitzadora L_N de potència negativa (Figura 19). El punt focal imatge F'_N de la lent L_N ha de coincidir amb el punt remot, PR , de l'ull miop. D'aquesta manera la imatge formada per la lent neutralitzadora d'un objecte situat a l'infinit estarà situada al punt remot, PR , de l'ull i aquest la veurà sense necessitat d'acomodar.

En la hipermetropia el defecte de potència de l'ull es corregeix amb una lent neutralitzadora L_N de potència positiva (Figura 20). Igual que en el cas anterior el punt focal imatge F'_N de la lent L_N ha de coincidir amb el punt remot, PR , de l'ull hipermetrop.

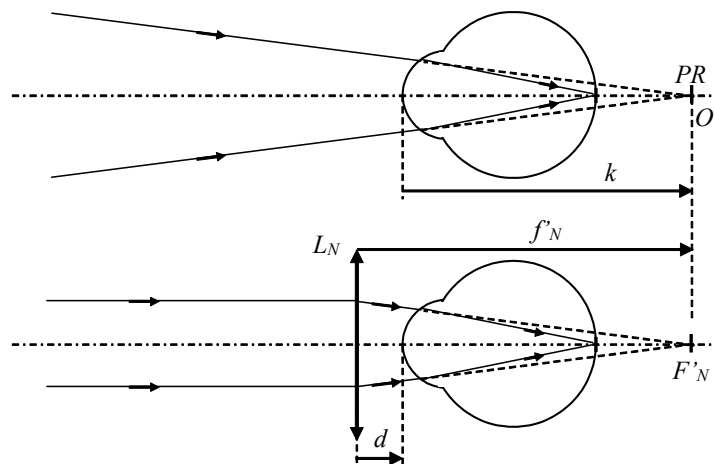


Figura 20. Correcció de la hipermetropia amb una lent prima positiva.

Per trobar la potència P'_N de la lent neutralitzador considerem la figura 19.

$$f'_N = k + d \quad (11)$$

Si expressem l'equació anterior en forma de potències i vergències.

$$\frac{1}{P'_N} = \frac{1}{K} + d \quad (12)$$

Aïllant s'obté que la potència de la lent neutralitzadora val:

$$P_N' = \frac{K}{1 + dK} \quad (13)$$

L'equació (13) té validesa general i permet calcular la potència neutralitzadora tant en el cas d'ulls miops com hipermetrops.

Correcció de l'astigmatisme mitjançant un sistema compensador

L'astigmatisme es corregeix mitjançant una lent neutralitzadora L_N que compensi el defecte o l'excés de potència en cada un dels meridians (Figura 21).

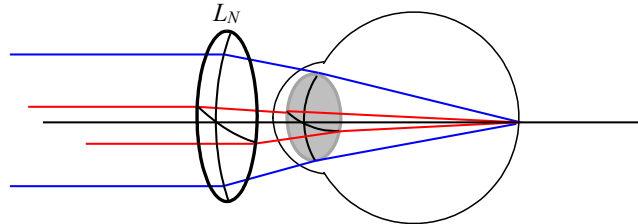


Figura 21. Correcció de l'astigmatisme

Correcció de la miopia i la hipermetropia mitjançant cirurgia refractiva

Le figures 22(a) i 22(b) mostren la correcció de la miopia i la hipermetropia mitjançant cirurgia refractiva del tipus LASIK. En el cas de la miopia el feix làser aplatina la còrnia i d'aquesta manera redueix el seu excés de potència. Pel cas de la hipermetropia el feix làser augmenta la potència de l'ull augmentant la curvatura de la còrnia.

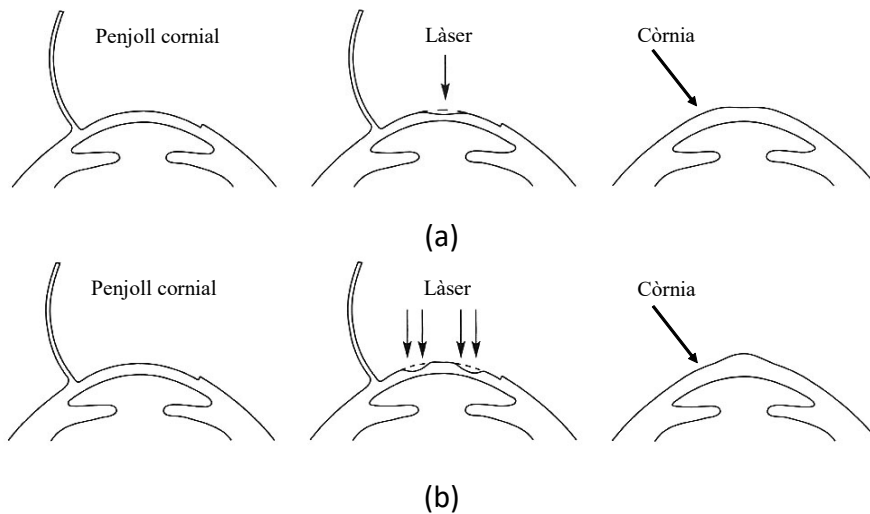


Figura 22. (a) Correcció de la miopia amb LASIK. (b) Correcció de la hipermetropia amb LASIK.

Mida de la imatge retiniana

Considerem un ull emmetrop. Sigui O un objecte que subtendeix un angle ω des d'aquest ull (Figura 23). La mida y' de la imatge retiniana O' és:

$$y' = \frac{1000}{60} \tan \omega \quad (14)$$

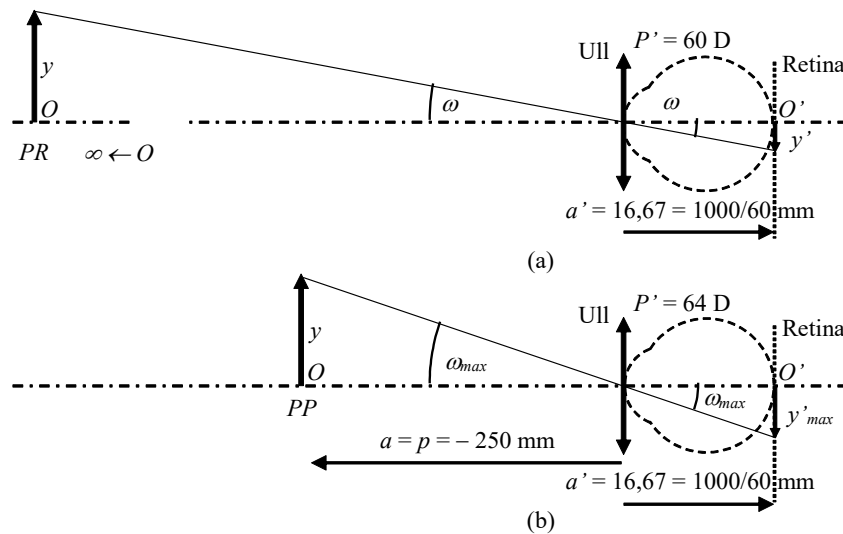


Figura 23. Mida de la imatge retiniana. (a) Objecte situat a l'infinit. (b) Objecte situat en el PP on s'obté la mida màxima.

La mida de la imatge retiniana, y' , és proporcional a la tangent de l'angle ω que subtendeix l'objecte respecte de l'ull de l'observador (Figura 23(a)). La mida màxima de la imatge es produirà quan l'objecte estigui situat en el PP (Figura 23(b)).

Augment lateral de la imatge retiniana per un objecte situat en el punt proper

Si prenem com a distància al punt proper el valor $p = -250$ mm, l'augment lateral m_0 valdrà (Figura 23(b)):

$$m_0 = \frac{a'}{a} = \frac{1000}{-250} = -\frac{1}{15} \quad (15)$$

El que significa que a ull nu, l'augment lateral màxim que es pot obtenir és $-1/15$.

Resolució de l'ull

La resolució de l'ull és la capacitat que té per veure separats dos punts molt propers entre si.

La resolució és màxima en la regió de la fòvea i decreix ràpidament en allunyar-nos d'ella. La llum ambiental també afecta la resolució de l'ull. El valor màxim de resolució s'obté per luminàncies de l'ordre de 1000 cd/m^2 .

A la pràctica la resolució es defineix de diferents maneres, adaptades a les diferents tasques que desenvolupa l'ull. La figura 24(a) es refereix a la capacitat de distingir dues fonts puntuals molt properes. La resolució màxima en aquest cas és $\theta_0 = 1'$. La figura 24(b) mesura el valor de resolució que es pren en optometria. Es tracta de la capacitat de l'ull per de resoldre la E de Snellen, formada per un conjunt de barres blanques i negres d'elevat contrast i equiespaciades entre elles. La resolució màxima

en aquest cas pren el valor $\theta_0 = 2'$. Si volem expressar aquest límit de resolució en forma de freqüència angular, el seu valor, u_0 , val:

$$u_0 = \frac{1 \text{ pl}}{2'} = \frac{1 \text{ pl}}{5,8 \cdot 10^{-4} \text{ rad}} = 1724 \frac{\text{pl}}{\text{rad}} = 30 \frac{\text{pl}}{\circ} \quad (16)$$

Finalment la figura 24(c) es refereix a la capacitat de l'ull de percebre traços alineats. En aquest cas és quan la resolució de l'ull és més elevada y el seu valor és $\theta_0 = 10'' = (1/6)'$.

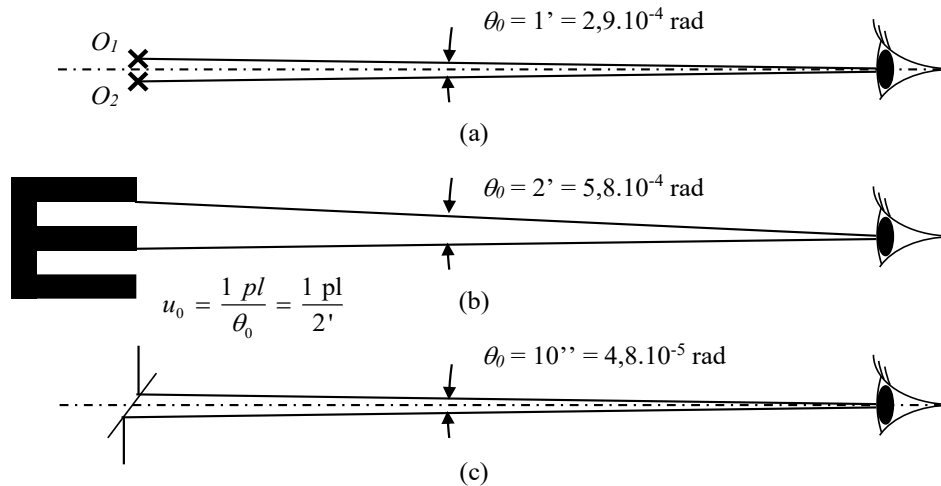


Figura 24. Tipus d'agudeses visual i valors límit.

La resolució lineal màxima es produirà quan l'objecte estigui situat en el PP . Si considerem la E de Snellen, la freqüència màxima de resolució o freqüència límit, $u_{0,PP}$, serà:

$$u_{0,PP} = \frac{1 \text{ pl}}{5,8 \cdot 10^{-4} \text{ rad}} \frac{1 \text{ rad}}{250 \text{ mm}} = 6,9 \frac{\text{pl}}{\text{mm}} \gg 7 \frac{\text{pl}}{\text{mm}} \quad (17)$$

La fórmula anterior estableix que en el punt proper la mida mínima $h_{\min, PP}$ de la lletra E d'Snellen perquè sigui resolta per l'ull en el PP és (Figura 25(a)):

$$h_{\min, PP} = 2,5 \text{ pl} \frac{1 \text{ mm}}{7 \text{ pl}} = 0,36 \text{ mm}. \quad (18)$$

La freqüència màxima o freqüència límit en la retina $u'_{0,PP}$ d'un objecte situat al PP , valdrà:

$$u'_{0,PP} = \frac{u_{0,PP}}{|m_0|} = \frac{u_{0,PP}}{\frac{1}{15}} = 15u_{0,PP} = 15(7) = 105 \frac{\text{pl}}{\text{mm}} \quad (19)$$

I la mida de la E de Snellen més petita que es pot resoldre a la retina serà (Figura 25(b)):

$$h'_{\min} = h_{\min} |m_0| = 0,36 \frac{1}{15} = 0,024 \text{ mm.} \quad (20)$$

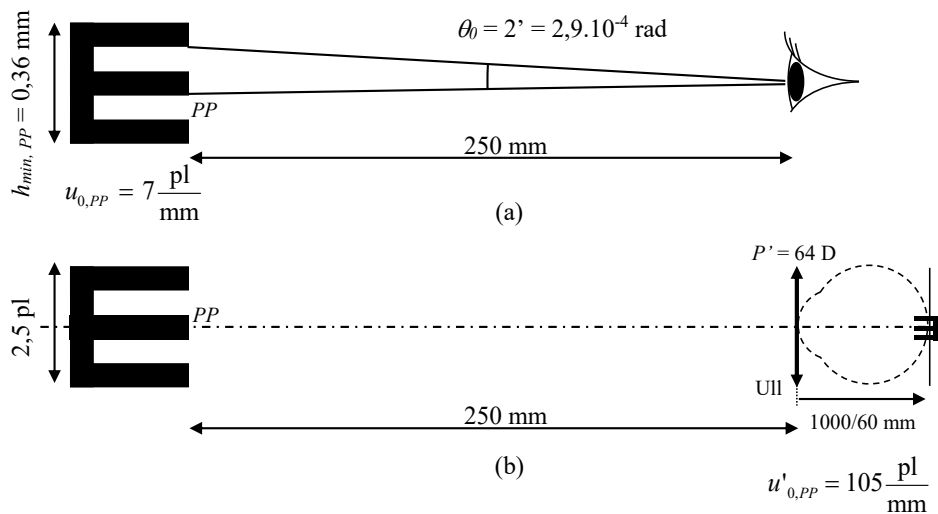


Figura 25. Mida mínima i freqüència màxima de resolució en el PP.

Un altre paràmetre que també afecta la resolució és la mida de la pupil·la. La resolució és màxima per diàmetres de pupil·la compresos entre 2 i 3 mm. Per diàmetres més petits de 2 mm la difracció empitjora la resolució i per diàmetres més grans de 3 mm són les aberracions òptiques les que empitjoren la resolució.

La figura 26 mostra els valors de resolució de l'ull per diferents diàmetres de la pupil·la¹.

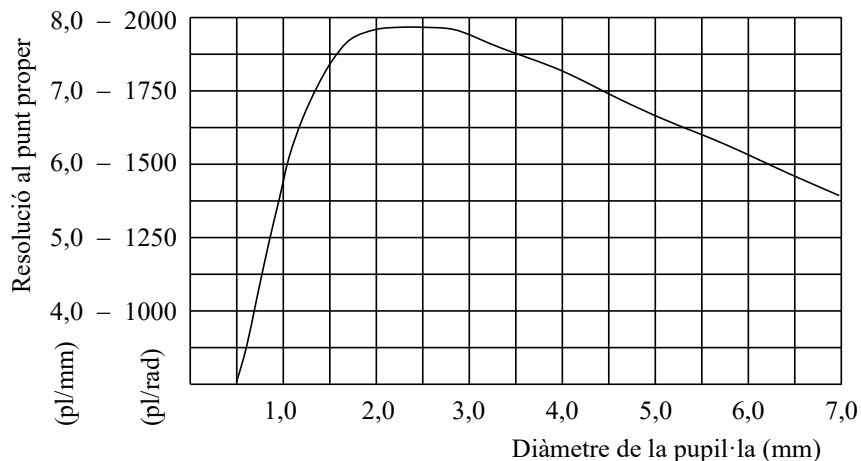


Figura 26. Resolució en el PP en funció del diàmetre de la pupil·la.

Mesura de l'agudes visual

Es defineix el mínim angle de resolució (MAR) com la resolució angular de l'ull θ en mig cicle o en una línia (Figura 27).

¹ Bruce H. Walker. "Optical Design for Visual Systems. p. 6. Spie Press. 2000.

Es defineix l'agudeses visual AV com:

$$AV = \frac{1}{\theta} \tag{21}$$

On θ s'expressa en minuts d'arc.

Una altre manera de mesurar l'agudeses visual és mitjançant l'escala logMAR. En aquesta escala la agudeses visual AV' ve donada per:

$$AV' = \log_{10} MAR = \log_{10} \theta \tag{22}$$

L'agudeses visual normal és dona quan $\theta = \theta_0 = 1'$ i val $AV = 1$ o bé $AV' = 0$.

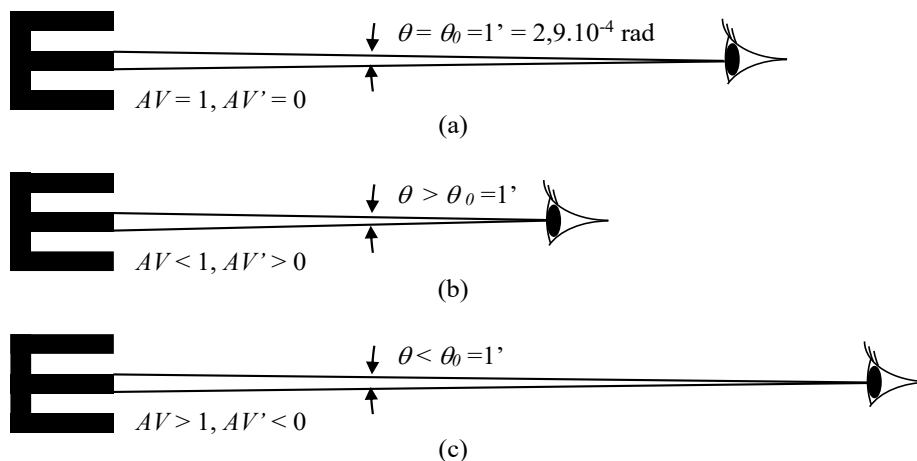


Figura 27. Angle de resolució (i agudeses visuals AV i AV'). (a) Agudeses visual normal. (b) Agudeses visual per sota de la normal. (c) Agudeses visual per sobre de la normal.

Per mesurar l'agudeses visual en visió de lluny es situa un test com el de la figura a la distància de 20 peus (mesura anglosaxona) o 6,10 metres \approx 6 metres (mesura europea). La figura 28 mostra un test per mesurar l'agudeses visual.

Un observador amb $AV = 1$ resol la línia 8 (20/20) a la distància de 20 peus (6,10 m). Si, per exemple, l'observador comença a resoldre a partir de la línia 5 (20/40) cap amunt, l'agudeses visual serà exactament la meitat que l'anterior.

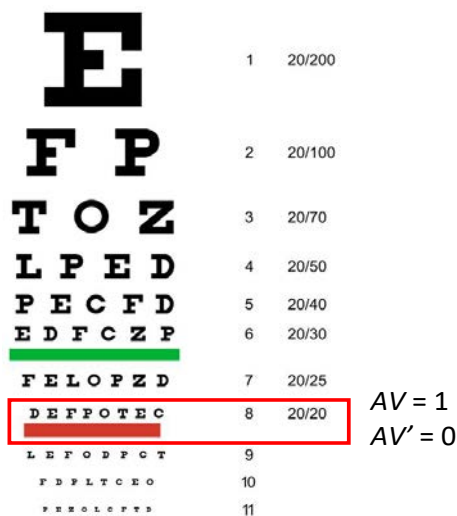


Figura 28. Test d'agudeses visual.

La taula 1 mostra alguns valors de AV i AV'.

Taula 1: Expressió de AV en unitats anglosaxones, europees i en format decimal. Valors de AV'.

AV Anglosaxona	AV Europea	AV Decimal	AV' logMAR
20/20	6/6	1.0	0.0
20/25	6/8	0.80	0.1
20/32	6/9	0.63	0.2
20/40	6/12	0.50	0.3
20/50	6/15	0.40	0.4
20/60	6/18	0.33	0.5
20/80	6/24	0.25	0.6
20/100	6/30	0.20	0.7
20/120	6/36	0.17	0.8
20/160	6/48	0.13	0.9
20/200	6/60	0.10	1.0