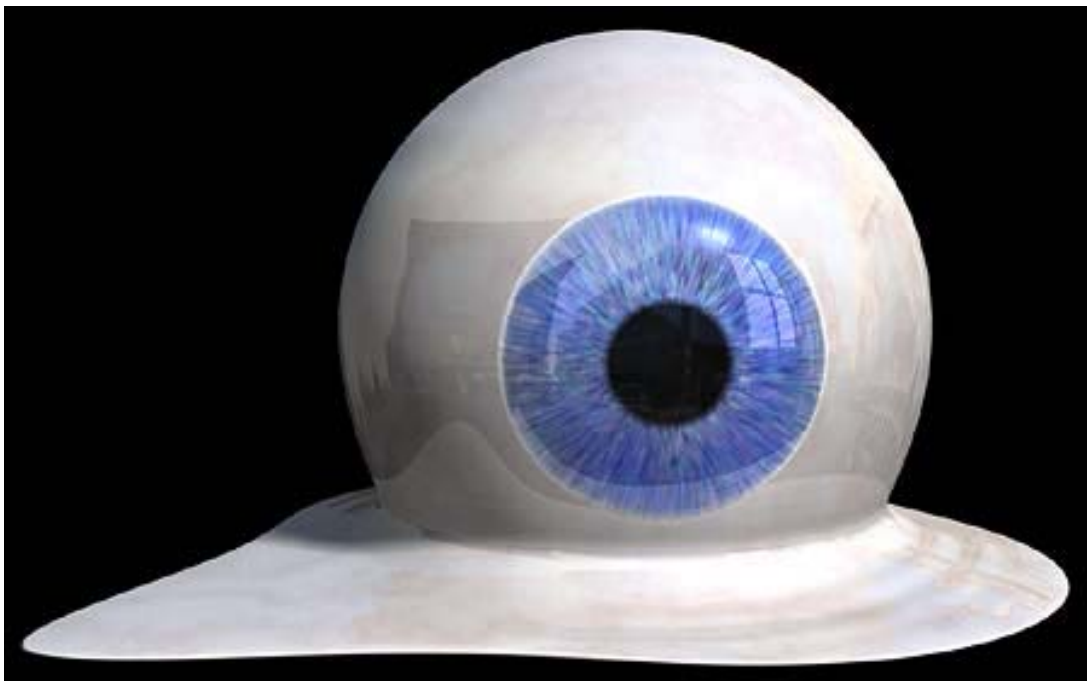


APOSTILA DO CURSO DE BIOENGENHARIA OCULAR
Laboratório de Instrumentação Oftálmica
Escola de Engenharia de São Carlos
Universidade de São Paulo

O Olho Humano e as Ametropias Oculares



Profa. Dra. Liliane Ventura

SUMÁRIO

1. O Olho Humano	2
2. Ametropias Oculares.....	5
2.1 - Hipermetropia	7
2.2 - A Acomodação Na Hipermetropia	8
2.3 - Miopia	10
3 - CORREÇÃO DAS AMETROPIAS ESFÉRICAS ATRAVÉS DE LENTES	11
4 - ASTIGMATISMO	12
4.1 - Tipos De Astigmatismo	12
4.2 - Sintomas.....	13
4.3 - Condição Ótica.....	14
4.4 - Círculo De Menor Confusão	16
4.5 - Algumas Propriedades dos Cilindros.....	16
5 - CORREÇÃO ÓTICA DAS AMETROPIAS	17
6 - ASTIGMATISMO - FORMALISMO MATEMÁTICO.....	19
7- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	22

1. O OLHO HUMANO

O olho humano pode ser dividido em seis funções físicas fundamentais^{1,2,3}: a *refração*, cujos elementos responsáveis são a córnea, o cristalino e os humores aquoso e vítreo; a *auto-focalização*, feita pelo cristalino e pelos músculos ciliares; o *controle da luminosidade interna* feito pela íris e pupila; a *deteccção*, feita pela retina (pelos cones e bastonetes); a *transmissão da informação ao cérebro*, feita pelo nervo e as vias ópticas; e a *refrigeração da retina* feita pela coróide.

Os elementos essenciais do olho, considerado como um sistema ótico, são mostrados na figura 1.

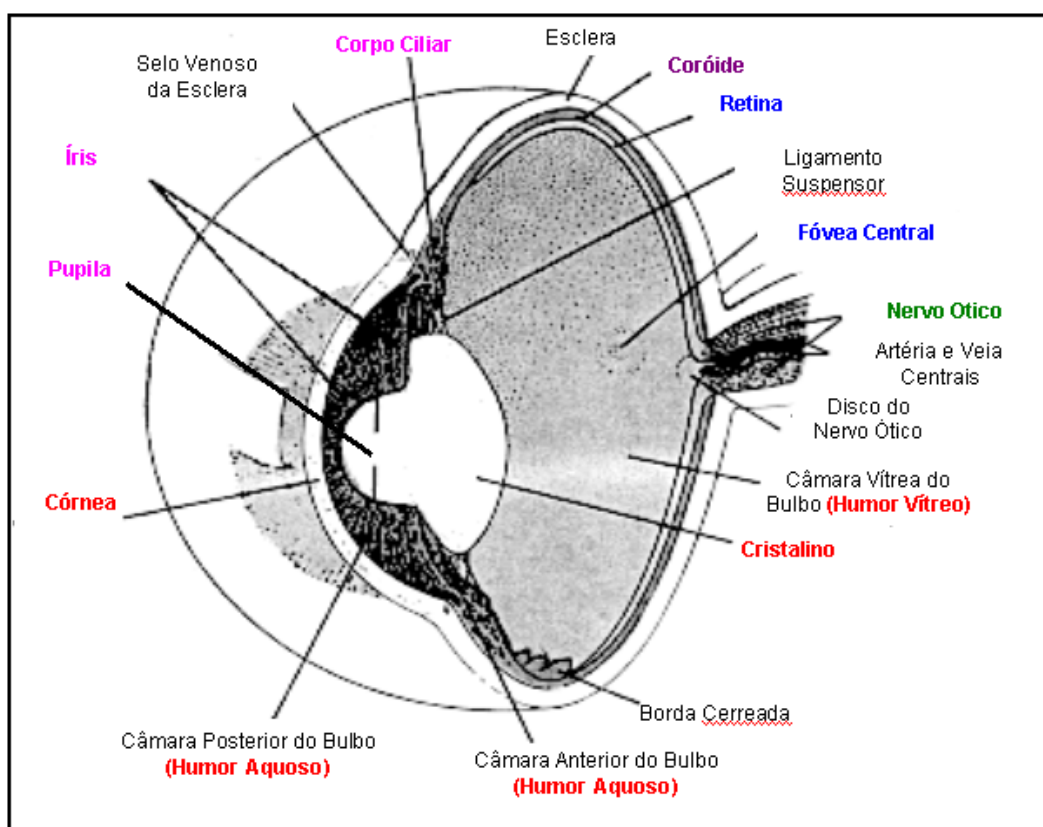


Figura 1: Representação esquemática do olho humano.

O globo ocular tem forma aproximadamente esférica e diâmetro em torno de 25mm. É constituído por uma membrana dura (cerca de 5/6 do globo ocular) e branca, denominada *esclerótica*. A parte frontal é mais curvada e coberta por uma membrana dura e transparente (cerca de 1/6 do globo ocular), chamada *córnea*, com poder de refração^{3,4} médio de 43,2di. A região atrás da córnea contém um líquido denominado *humor aquoso*. A seguir, encontra-se a *lente cristalina*, ou simplesmente o *cristalino*, que consiste numa cápsula contendo uma gelatina fibrosa, rija na região central e menos consistente nas margens. O índice de refração do cristalino varia de modo

crescente do centro para as bordas (índice de refração médio de 1,437), no intuito de corrigir aberrações esféricas. O cristalino é preso por ligamentos ao músculo ciliar. Atrás do cristalino, o olho é preenchido por uma substância gelatinosa transparente chamada *humor vítreo*. Os índices de refração, tanto do humor vítreo como do humor aquoso, são aproximadamente iguais ao da água, cerca de 4/3. Como não há grande diferença entre os três índices citados, a luz que penetra no olho se refrata principalmente na córnea. O sistema ótico ocular possui um poder de refração variável^{3,4} entre 58,64di a 70,57di.

A coróide é uma camada rica em vasos sangüíneos que reveste a parte interna da esclerótica. Funciona como uma espécie de "sistema de refrigeração" para a retina, através da dissipação de energia pelo fluxo sangüíneo.

Grande parte do olho é coberta por uma delicada membrana, denominada *retina*, que é constituída por fibras nervosas. Tais fibras que se reúnem no nervo ótico começam próximas a minúsculas estruturas chamadas *bastonetes e cones*. Ambos recebem a imagem ótica e a transmitem ao cérebro, por impulsos semelhantes aos elétricos.

Existe uma ligeira depressão na retina chamada *mancha amarela ou mácula lútea*. Em seu centro existe uma diminuta região, com cerca de 0,25 mm de diâmetro, denominada *fovea centralis*, que contém exclusivamente cones. A visão na fóvea é muito mais nítida do que em outras regiões da retina; os músculos que controlam o olho giram sempre o globo ocular até que a imagem do objeto para o qual a atenção está voltada caia na fóvea. A região marginal da retina serve apenas para dar um aspecto geral do campo de visão. A fóvea é tão pequena que há necessidade de se movimentar o olho para focalizar distintamente dois pontos tão próximos como os do sinal de pontuação denominado "dois pontos" (:).

Na região em que o nervo ótico penetra no globo ocular não existem bastonetes e nem cones, e as imagens aí formadas não podem ser vistas. Essa região é denominada *ponto cego*.

Em frente ao cristalino acha-se a *íris*, no centro da qual existe uma abertura denominada *pupila*. A função da pupila é regular a quantidade de luz que entra no olho, dilatando-se automaticamente se o brilho do campo for fraco e contraindo-se quando o brilho aumenta. Entretanto, o diâmetro pupilar sofre uma variação de apenas quatro vezes (corresponde a uma variação em área de 16 vezes), enquanto a variação correspondente ao brilho é superior a 100 mil vezes. O mecanismo receptor da retina adapta-se, ele próprio, às grandes diferenças de quantidade de luz.

Para que um objeto seja enxergado distintamente, sua imagem, formada na retina, deve ser nítida. Se todos os elementos do olho fossem rigidamente fixos em suas posições, apenas os objetos situados a uma certa distância formariam imagens nítidas na retina. Entretanto, o olho normal pode focalizar nitidamente objetos situados a qualquer distância, desde o infinito até cerca de 15cm à sua frente. Isso se torna possível pela ação do cristalino e do músculo ciliar ao qual ele é ligado. Quando em repouso, o olho normal é focalizado no infinito, isto é, o segundo foco está sobre a retina. Quando se deseja ver um objeto mais próximo, o músculo ciliar contrai-se e o cristalino toma uma forma quase esférica. Esse processo é denominado **acomodação visual**.

A maior e a menor distâncias para as quais é possível a visão distinta são

chamadas **ponto remoto** e **ponto próximo** do olho, respectivamente. O PONTO REMOTO de um olho normal fica situado no infinito. A posição do PONTO PRÓXIMO depende, evidentemente, de quanto pode ser aumentada a curvatura do cristalino, mediante a acomodação. A variação da acomodação diminui gradualmente com a idade, à medida que o cristalino perde sua flexibilidade. Por esse motivo, o ponto próximo afasta-se gradualmente, à medida que se envelhece. Esse afastamento do ponto próximo com a idade é chamado **presbitismo** ou **presbiopia**, não devendo, entretanto, ser considerado um defeito de visão, já que se processa mais ou menos da mesma forma em todos os olhos normais.

2. AMETROPIAS OCULARES

Existem vários defeitos comuns de visão^{2,5}, devidos unicamente a uma relação incorreta entre os diversos elementos constitutivos do globo ocular, considerado como sistema ótico. Em outras palavras, os erros refrativos oculares são devidos à desarmonia entre o sistema ótico e o comprimento axial do olho.

O olho **emétrope** (normal), quando em repouso (livre da acomodação visual), forma na retina a imagem de objetos situados no infinito, como mostrado na figura 2a.

Olho **amétrope** é aquele para o qual o ponto remoto não está situado no infinito. As duas formas mais simples de ametropia são a **miopia** (ou braquimetropia) e a **hipermetropia**. Esses dois defeitos estão ilustrados nas figuras 2.2b e 2.2c.

Na miopia, o globo ocular é muito alongado em relação ao poder de refração do sistema ótico e os raios originados de um objeto situado no infinito convergem a um plano anterior à retina. O objeto mais afastado, cuja imagem se forma na retina, não está situado no infinito ou, em outras palavras, o ponto remoto se encontra a uma distância finita. Por outro lado, para a acomodação normal, o ponto próximo de um olho míope fica mais próximo que o de uma pessoa com vista normal.

Na hipermetropia, o globo ocular é curto em relação ao poder de refração do sistema ótico; a imagem de um objeto situado no infinito se forma atrás da retina. Mediante a acomodação, os raios paralelos poderiam convergir na retina, mas, evidentemente, se a capacidade de acomodação for normal, o ponto próximo estará mais distante que o de um olho emétrope.

Os dois defeitos de visão citados são devidos a causas opostas. Na miopia, a convergência de um feixe de raios paralelos é demasiadamente grande de modo que a imagem se forma antes da retina; na hipermetropia, a convergência é insuficiente. Assim, miopia e hipermetropia são fenômenos relativos (um olho míope pode possuir dimensões axiais normais, porém com alto poder de convergência do sistema ótico, por exemplo).

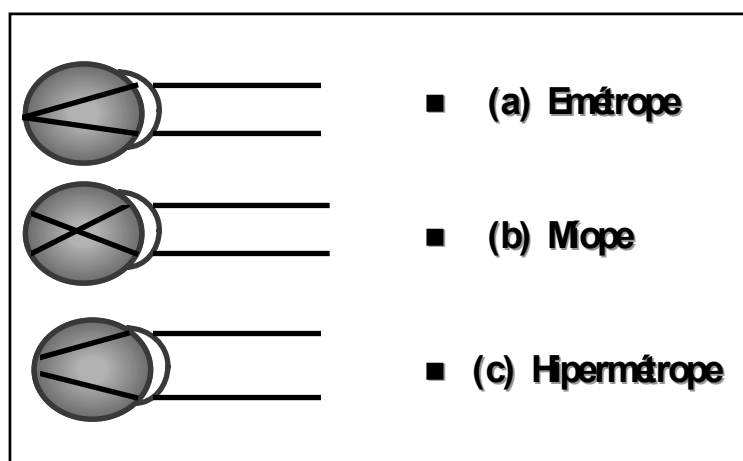


Figura 2: Ametropias Oculares: (a) emetropia; (b) miopia; (c) hipermetropia.

Note que as imagens formadas nos olhos amétropes sempre são invertidas, porém formando-se anteriormente ou posteriormente à retina para os olhos míopes e hipermetrópes, respectivamente. A figura 3 ilustra as formações das imagens para olhos emétopes e amétropes.

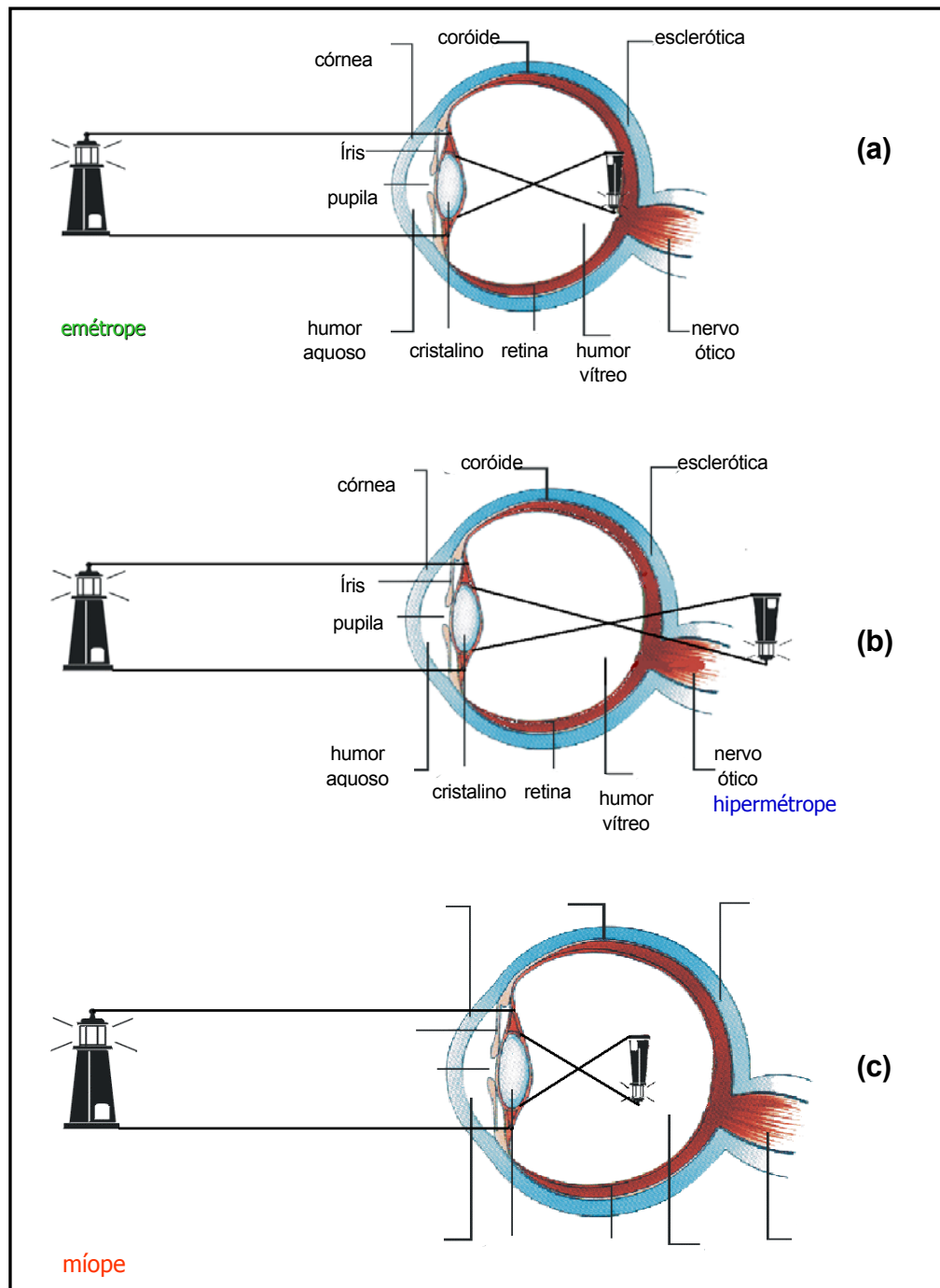


Figura 3: Formações das imagens para olhos: (a) emétopes; (b) hipermetrópes; (c) míopese.

Há também um outro tipo de ametropia, denominado **afacia**, que é a ausência do cristalino, tornando o olho extremamente hipermetrope.

O **astigmatismo**, por sua vez, é um defeito da visão geralmente devido à não esfericidade da superfície da córnea; o raio de curvatura dessa superfície não é o mesmo em todos os meridianos - assemelha-se a uma bola de futebol americano (elipsóide), onde os meridianos de maior e menor curvaturas estão a 90° . O astigmatismo faz com que seja impossível, por exemplo, focalizar simultaneamente as barras horizontais e verticais de uma janela.

Assim, o astigmatismo é a condição de refração onde feixes de luz, provenientes de uma fonte luminosa puntual situada no infinito, paralelamente incidentes em diferentes meridianos formam imagens em diferentes posições no eixo ótico (pontos focais diferentes para cada meridiano entre 0° e 180° - figura 4).

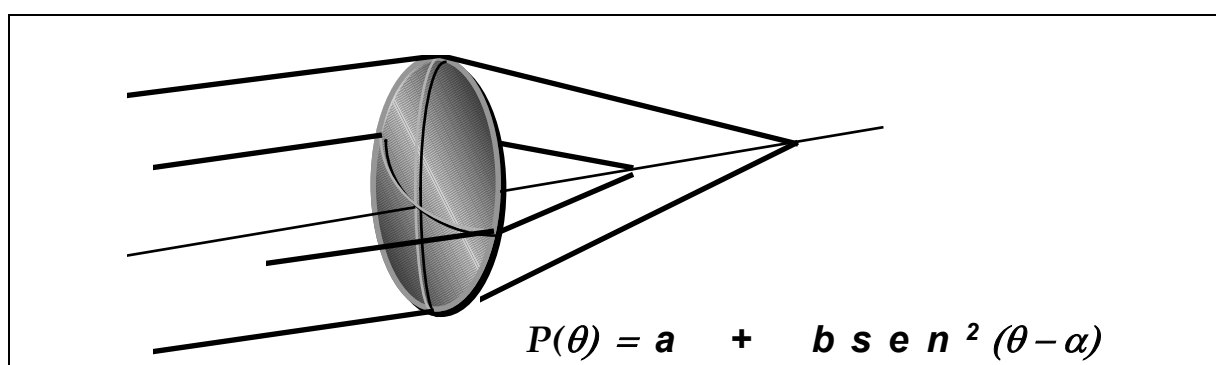


Figura 4: Representação de quatro raios de luz incidentes num olho astigmático.

Miopia, hipermetropia e astigmatismo são discutidos a seguir detalhadamente.

2.1 - HIPERMETROPIA⁵

A **hipermetropia** é a forma de erro de refração na qual os raios luminosos paralelos são trazidos a um foco a uma certa distância atrás da retina, quando o olho encontra-se em repouso.

Houve época em que se aceitava que, na maioria dos casos de hipermetropia, o defeito fosse axial⁵ e persiste a crença de que, de fato, o olho hipermetrope tenha um eixo ântero-posterior mais curto do que o normal. Entretanto, é possível que o olho hipermetrope tenha um comprimento axial maior do que um olho míope, e ainda permanece alguma incerteza quanto à importância relativa do comprimento axial e o poder de refração como influências na causa da hipermetropia.

Via-de-regra, o grau de encurtamento não é grande e raramente excede 2mm. Cada milímetro de encurtamento representa aproximadamente 3di de alteração na refração e, por conseguinte, uma hipermetropia de mais de 6di é incomum. Graus maiores, entretanto, ocorrem, como nos casos de até 24di sem qualquer outra

anormalidade patológica ter sido verificada; e, certamente, nas aberrações patológicas do desenvolvimento, tais como na microftalmia, este valor pode ser ultrapassado.

A *hipermetropia de curvatura* ocorre quando a curvatura de qualquer das superfícies refringentes é excessivamente pequena. A córnea é a sede habitual da anomalia e pode mostrar-se achatada congenitamente (córnea plana) ou ser resultado de traumatismo ou doença. Um aumento de 1mm no seu raio de curvatura produz uma hipermetropia de 6di. Nesses casos, entretanto, é raro que a curvatura permaneça esférica e será produzido quase que invariavelmente um astigmatismo. A *hipermetropia de índice*, como de hábito, manifesta-se na forma de uma diminuição na refringência eficaz do cristalino.

Uma luxação posterior do cristalino também causa hipermetropia, resultado de uma anomalia congênita ou de traumatismo ou doença; e a ausência do cristalino resulta também num grau acentuado de hipermetropia.

2.2 - A ACOMODAÇÃO NA HIPERMETROPIA

A hipermetropia^{2,5} é subdividida em várias porções devido à influência interagente da acomodação visual nas medidas. Ela é subdividida em *hipermetropia total (HT)*, composta pela *hipermetropia latente (HL)* e pela *hipermetropia manifesta (HM)*; *hipermetropia absoluta (HA)*; e *hipermetropia facultativa (HF)*.

A *HM* é a hipermetropia que pode ser medida pelo médico sem a paralisação do músculo ciliar.

A contração do músculo ciliar no ato da acomodação aumenta o poder de refração do cristalino, de forma a corrigir um certo grau de hipermetropia. Normalmente, há um grau apreciável corrigido pela contração envolvida no tônus fisiológico deste músculo e, conseqüentemente, o grau completo de hipermetropia só é revelado quando este músculo é paralisado pelo uso de uma droga como a atropina. Dizemos, assim, que o olho foi cicloplegiado. Desta forma, é possível medir-se a *HT*. A variação entre a *HM* e a *HT* é a *HL*.

Com a atuação total da acomodação visual, a pessoa hipermélope é capaz de amenizar este erro de refração, porém, se o erro é grande e, independentemente do esforço da acomodação, o indivíduo não consegue ver o objeto de modo nítido, o grau de hipermetropia que ainda permanece sem correção e que não pode ser vencido pela acomodação é a *HA*. A quantidade de *HA* corresponderá ao menor poder da lente corretora a ser prescrita ao paciente.

Pórem, através de vários fatores, tais como, psíquicos, sociais, entre outros, o médico pode prescrever uma lente corretora cujo poder de refração está dentro do intervalo entre a *HA* e a *HM*. Este intervalo corresponde à *HF*.

A seguir, um diagrama-exemplo poderá ajudar a compreender todas estas denominações.

No diagrama a seguir, é exemplificado um paciente com *HM* (sem cicloplégico) de +4di e *HT* (com cicloplégico) de +6di, ou seja, com uma hipermetropia escondida de +2di (*HL*).

A relação entre estas hipermetropias pode ser melhor compreendida segundo o

método empregado para determiná-las clinicamente. Suponhamos que um hipermetrope não consiga ver um objeto distante nitidamente. São colocadas então lentes convexas de intensidade gradualmente crescente na frente de seus olhos, até que possa ver com clareza; neste momento, o cristalino e a sua acomodação encontram-se em atividade, de forma que, com a combinação de ambos, uma imagem distinta é observada. O grau de hipermetropia corrigida pela lente, ou seja, o grau que pelos seus esforços de acomodação não pode ser corrigido, é a hipermetropia absoluta, e é medida pela lente convexa mais fraca com que a acuidade visual máxima pode ser obtida. No caso do exemplo, a HA é de +1di.

Avaliadas as HM e HA, através de uma análise subjetiva por parte do paciente, que se submeterá ao teste de várias lentes, cujos poderes de refração variam entre +1di e +4di (HF), em nosso exemplo, e por análise psíquica e social feita pelo médico, é indicada a lente corretora (+3di, no caso de nosso paciente do diagrama I).

Diagrama I

TOTAL	+ 6 di	com cicloplégico	Hipermetropia latente ou escondida
MANIFESTA	+4 di	sem cicloplégico	
	+3di	dioptria da lente corretora prescrita	Hipermetropia Facultativa
ABSOLUTA	+1di	acuidade visual = 1,0	

2.3 - MIOPIA⁵

Na grande maioria dos casos, certamente nos graus mais intensos, a miopia é **axial**, isto é, deve-se a um aumento no diâmetro ântero-posterior do olho.

A *miopia de curvatura* pode estar associada a um aumento na curvatura da córnea ou de uma ou ambas as superfícies do cristalino. A maior curvatura da córnea ocorre não infreqüentemente, mas é, em geral, evidente como um erro astigmático e não esférico. Pequenos desvios do normal são comuns, visto que o raio da córnea normal varia dentro dos limites de 7,0 a 8,5mm, que podem ser de importância considerável, já que uma variação de 1,0mm resulta numa modificação da refração de 6di.

No que diz respeito à *miopia de índice*, uma modificação do índice de refração do aquoso ou do vítreo nunca é tão grande a ponto de exercer qualquer efeito apreciável. Por outro lado, modificações no cristalino podem certamente levar à miopia. É possível que uma diminuição do índice de refração do córtex desempenhe um papel na miopia diabética. Uma refringência aumentada do núcleo do cristalino é responsável pela miopia encontrada na catarata incipiente; de fato, o cristalino pode não se tornar opaco, mas o seu núcleo pode simplesmente tornar-se cada vez mais refringente, com o que se desenvolve lá uma miopia progressiva.

No recém-nascido, o olho normal é hipermetrópe e, com o passar do tempo e o crescimento, isso tende a regredir. Em alguns casos permanece a hipermetropia; em outros, a emetropia é alcançada e o desenvolvimento torna-se estabilizado neste ponto; ao passo que, em alguns, a tendência evolui e resulta um grau maior ou menor de miopia. O período de crescimento é, portanto, o elemento crucial do ponto de vista da miopia.

CONDIÇÃO ÓTICA

No olho míope, os raios luminosos paralelos dirigem-se para um foco na frente da retina; a imagem sobre a retina compõe-se, portanto, de círculos de difusão formados pelo feixe divergente (figura 2b). Conclui-se que os objetos distantes não podem ser visualizados claramente; apenas os raios divergentes encontrar-se-ão na retina e, assim, a fim de ser visto claramente, um objeto qualquer deve ser trazido para perto do olho, de modo que os raios que dele emanam tornem-se suficientemente divergentes. O ponto remoto, no olho míope, está a uma distância finita - quanto maior o grau de miopia, menor a distância. Essa distância é, por conseguinte, uma medida do grau de miopia: se o ponto distante for de 1m do olho, há -1di de miopia; se for de 2m, -0,5di, etc.

3 - CORREÇÃO DAS AMETROPIAS ESFÉRICAS ATRAVÉS DE LENTES

As lentes convergentes e as divergentes⁶, como os próprios nomes dizem, têm a propriedade de convergirem e divergirem, respectivamente, a luz nelas incidentes, uma vez que a fonte de luz encontra-se numa região entre o infinito e sua distância focal.

Sendo assim, fica fácil deduzir que um olho hipermetrope necessita de lentes convergentes para sua correção, enquanto um olho míope, de lentes divergentes. Senão, vejamos:

Um olho hipermetrope não é apto, através da acomodação visual, a trazer à retina a imagem de um objeto num ponto próximo (embora, em alguns casos, seja capaz, gerando, contudo, sintomas que o incomodam) e tampouco, obter imagens nítidas de objetos situados no infinito sem ativar a acomodação visual. Assim, se os raios provenientes do infinito atingirem o olho com determinada convergência, a imagem deverá ser formada na retina. Isso é feito com lentes convergentes (veja figura 5a).

Para o míope ocorre o contrário, pois ele não consegue "relaxar" o cristalino o suficiente para que a imagem de um objeto situado no infinito caia sobre a retina. Como esta imagem está sempre localizada anteriormente à retina, os raios provenientes do infinito devem atingir o olho com uma divergência adequada para que a imagem forme-se na retina. Isso é feito com lentes divergentes (figura 5b).

Para corrigir estes erros refrativos através de lentes, a lente a ser utilizada deve ser tal que a sua distância focal coincida com o ponto remoto do olho em questão. Em outras palavras, a imagem que a lente corretora fornece de um objeto situado no infinito deve ser formada no ponto remoto do globo ocular, podendo, então, ser vista sem esforço. Dessa forma, o foco imagem F' deve coincidir com o ponto remoto do olho.

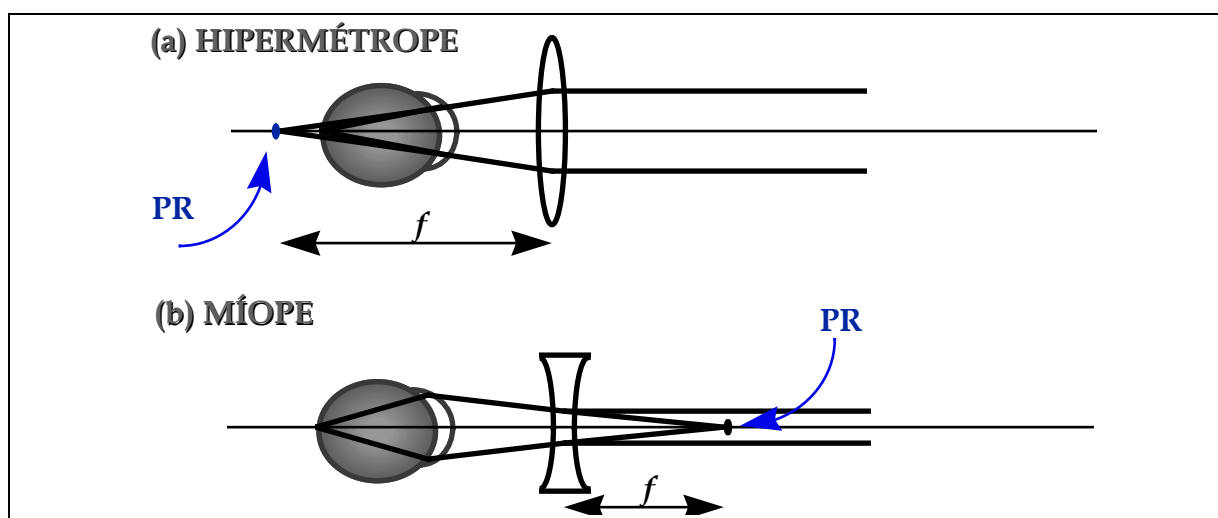


Figura 5: Correção através de lentes para a: (a) hipermetropia; (b) miopia.

4 - ASTIGMATISMO⁵

O astigmatismo pode ser um erro de curvatura, de centralização ou do índice de refração⁵.

O *astigmatismo de curvatura*, se de um grau mais intenso, tem sua origem mais freqüente na córnea. A anomalia é em geral congênita e as medidas oftalmométricas mostram que a sua ocorrência em pequenos graus é comum. O erro mais freqüente é aquele em que a curva vertical é maior que a horizontal ("meridiano mais curvo" de aproximadamente 0,25di). Este é conhecido como *astigmatismo direto* ("a favor da regra"), e é aceito como fisiológico; presumivelmente se deve a uma pressão constante da pálpebra superior sobre o olho. Marin Amat⁵ descobriu que, enquanto no nascimento a córnea é normalmente quase esférica, este tipo de astigmatismo está presente em 68% das crianças aos 4 anos de idade, e em 95% aos 7 anos. Há evidência de que tende a aumentar em grau muito discreto nos anos seguintes; porém, com a idade, tende a desaparecer ou mesmo tornar-se em *astigmatismo inverso* ("contra a regra"), com a curvatura vertical menor do que a horizontal.

O astigmatismo adquirido também se observa com freqüência. Patologia da córnea resulta em sua deformidade; um exemplo extremo disso é observado na córnea cônica, embora as inflamações e as ulcerações tenham o mesmo efeito.

O astigmatismo de curvatura do *cristalino* também ocorre com grande freqüência. Na grande maioria dos casos, anomalias dessa natureza são pequenas; porém, às vezes, como no lenticone, podem ser acentuadas. Com freqüência, o cristalino é colocado em ligeira obliquidade ou fora dos planos normais do sistema ótico, e isso, provocando um certo grau de descentralização, produz um astigmatismo correspondente; uma subluxação traumática do cristalino possui resultados semelhantes. Finalmente, um pequeno grau de *astigmatismo de índice* ocorre na fisiologia do cristalino. Este é, em geral, discreto, e se deve a pequenas desigualdades do índice de refração dos diferentes setores, porém pode ser acentuado, produzindo distorção considerável.

4.1 - TIPOS DE ASTIGMATISMO

O astigmatismo em que os dois meridianos principais encontram-se em ângulos retos e que é, portanto, passível de correção, é denominado de *regular*. Na grande maioria desses casos, os meridianos de maior e menor curvatura estão próximos ou realmente verticais e horizontais ou vice-versa. Caso isso não ocorra desse modo e uma vez que o meridiano maior e o menor estejam em ângulos retos, teremos então um astigmatismo regular que denominamos *astigmatismo oblíquo*. Quando os eixos não se encontram em ângulos retos, mas são cruzados obliquamente, o sistema ótico é ainda passível de resolução numa combinação esferocilíndrica, e a condição pode ser denominada de *astigmatismo bioblíquo*; não é de ocorrência muito comum.

Quando existem irregularidades na curvatura dos meridianos de forma que nenhuma figura geométrica adere aos mesmos, a condição é denominada *astigmatismo irregular*, não permite sua correção adequada por óculos.

ASTIGMATISMO REGULAR

O astigmatismo regular pode ser classificado da seguinte maneira (figura 6):

1. *astigmatismo simples*, onde um dos focos incide sobre a retina. O outro foco pode incidir na frente ou atrás da retina, de forma que enquanto um meridiano é emétrepe, o outro é hipermétrepe ou míope. Estes são, respectivamente, designados de *astigmatismo hipermétrepe simples* e *míope simples*.

2. *astigmatismo composto*, onde nenhum dos dois focos localiza-se sobre a retina, porém ambos localizam-se na frente ou atrás dela. O estado da refração é inteiramente hipermétrepe ou inteiramente míope. O primeiro é conhecido como *astigmatismo hipermétrepe composto*, e o último como *astigmatismo míope composto*.

3. *astigmatismo misto*, onde um foco localiza-se na frente e outro atrás da retina, de forma que a refração é hipermétrepe em uma direção e míope na outra.

O tipo habitual fisiológico de astigmatismo, onde a curva vertical é maior do que a horizontal, é denominado de *astigmatismo direto* ou astigmatismo "com a regra"; em caso inverso, trata-se de um *astigmatismo indireto* ou astigmatismo "contra a regra".

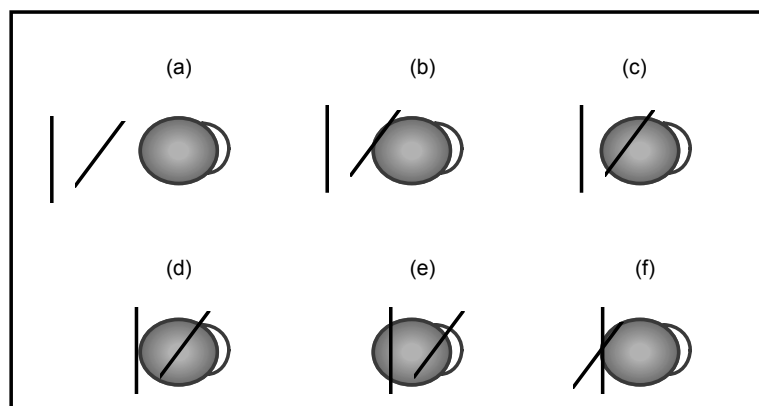


Figura 6: Classificação do astigmatismo regular: (a) hipermétrepe composto; (b) hipermétrepe simples; (c) misto; (d) míope simples; (e) míope composto; (f) sem astigmatismo.

4.2 - SINTOMAS

Quando o grau de astigmatismo é apreciável, visto que em nenhuma circunstância o olho é capaz de formar uma imagem nitidamente definida sobre a retina, a diminuição da acuidade visual pode ser bastante considerável. Na tentativa de ver claramente, o paciente tenta focalizar o círculo central de menor confusão (vide item 4.4 - "Círculo de Menor Confusão"). A visão do astigmata mostra peculiaridades outras que a indistinção, a despeito da forma alongada dos círculos de difusão que tem de interpretar. Os círculos tornam-se alongados, acurvados; um ponto de luz aparece borrado; e uma linha, que consiste numa série de pontos, aparece como uma sucessão de linhas fundidas numa imagem borrada.

Imaginemos um indivíduo astigmático focalizando sobre uma linha focal vertical e olhando em duas linhas retas que ficam uma perpendicular à outra (figura 7). Podemos imaginar as linhas compostas de um número infinito de pontos, cada um dos quais aparecendo na sua retina como uma linha vertical curta (ou, mais corretamente, uma elipse). A linha horizontal, portanto, aparece como uma série de elipses verticais que coalescem numa faixa borrada larga, enquanto que no caso da linha vertical, as elipses verticais se sobrepõem, de modo que toda a linha aparece nitidamente definida, somente com a parte mais superior e a mais inferior das elipses constituintes se estendendo além dela, determinando um aspecto borrado e fazendo-a parecer mais longa do que normalmente é. Inversamente, se a linha focal horizontal for focalizada, as linhas verticais tornam-se borradas.

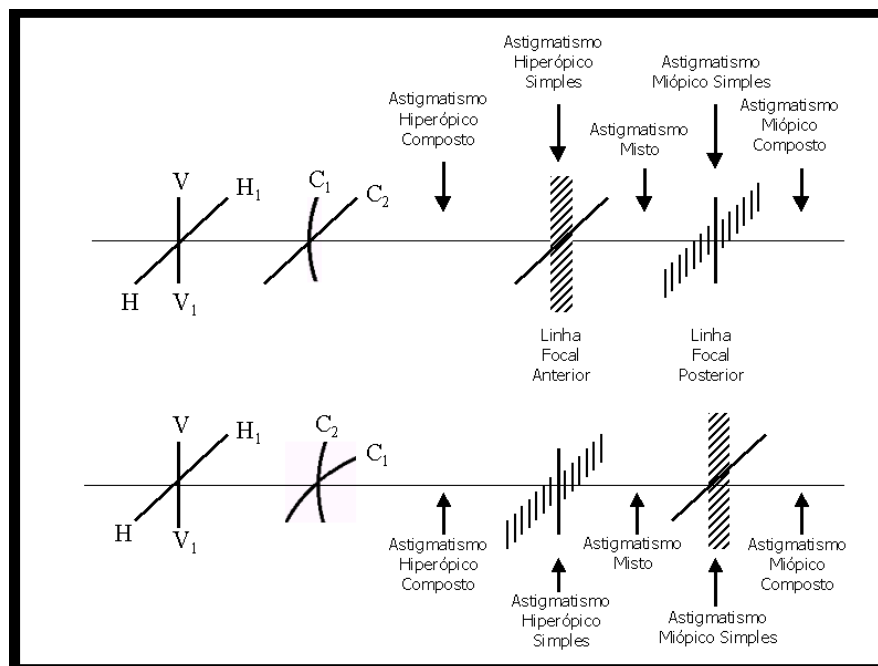


Figura 7: Formação da imagem de uma figura em forma de cruz para os vários tipos de astigmatismo regular.

Assim, em todo caso de astigmatismo regular, há uma direção na qual as linhas parecem mais distintas e uma na qual parecem mais confusas. Toma-se vantagem disso na detecção do astigmatismo por uma figura em forma de ventilador. Se o eixo do cilindro for oblíquo, a cabeça é virada para um lado de modo a reduzir a distorção.

4.3 - CONDIÇÃO ÓTICA

Uma esfera é uma superfície em que todos os seus meridianos possuem a mesma curvatura.

No entanto, nem todas as superfícies são esféricas (astigmáticas); aquelas que

não são geralmente não formam imagens estigmáticas. Tais superfícies são denominadas *tóricas* - tipo particular de superfície não esférica (figura 8).

Um cilindro também pode ser considerado uma superfície tórica, porém com r_2 infinitamente longo (figura 9a).

Uma das características do cilindro é que o feixe de luz que nele incide, proveniente de um ponto, é refratado de modo a formar uma linha correspondente, ou seja, a cada ponto incidente, há uma linha refratada correspondente. A figura 9b pode melhor ilustrar este fato.

Podemos observar que a luz, quando incide paralela ao eixo de revolução do cilindro, não sofre desvio.

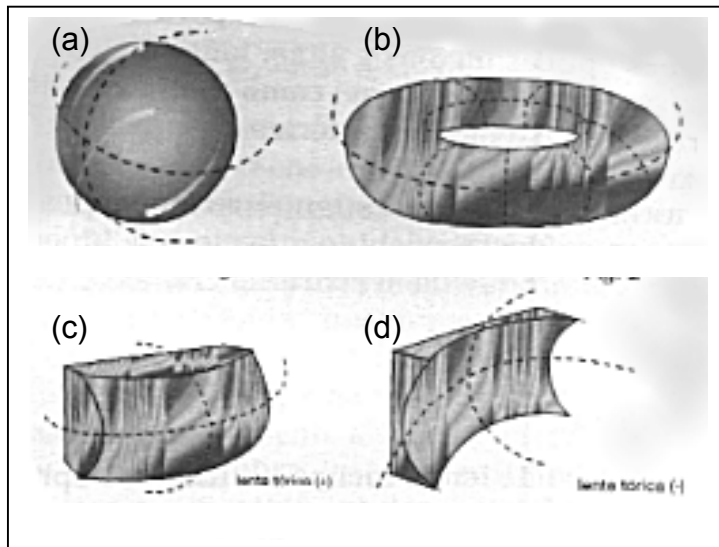
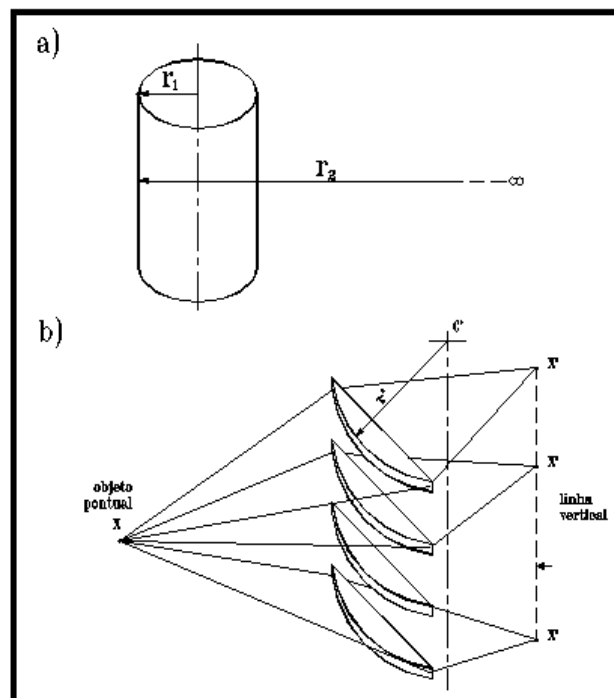


Figura 8: Representação de superfícies: (a) esféricas; (b) tóricas; (c) cilíndrica positiva; (d) cilíndrica negativa.

Figura 9 : (a) Representação de um cilindro; (b) Representação da formação da imagem a partir de um feixe paralelo de luz, proveniente de uma fonte puntual, incidente numa lente cilíndrica.



4.4 - CÍRCULO DE MENOR CONFUSÃO^{2,5}

Observemos a figura 9. Um objeto puntual luminoso incide numa lente astigmática formando uma imagem num anteparo. Colocando-se o anteparo paralelo ao plano da lente, na posição da seta azul, observar-se-á uma linha vertical como imagem. Se agora movermo-lo para a posição da seta amarela, formar-se-á uma linha horizontal.

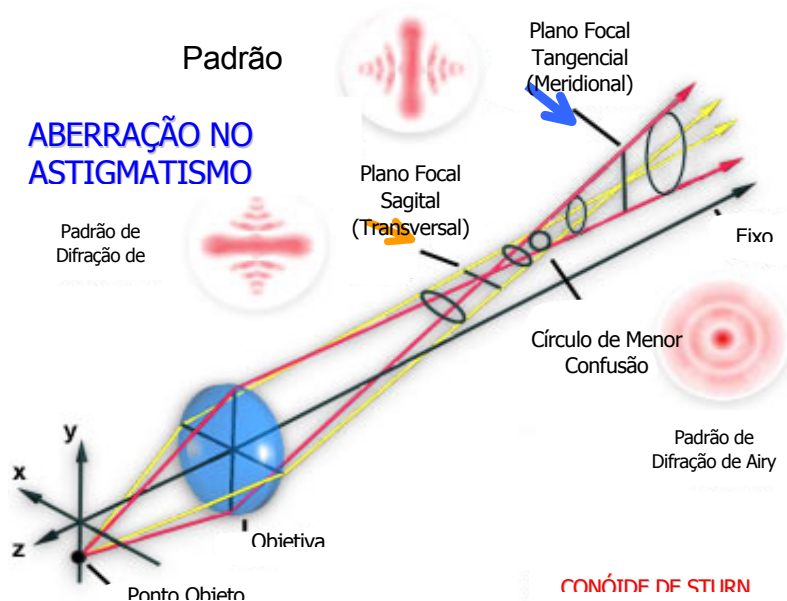


Figura 10: Representação do círculo de menor confusão.

Entre essas duas posições, várias imagens formar-se-ão, como ilustrado. Porém, existe uma certa posição onde teremos a imagem de um círculo, denominada **círculo de menor confusão**, e que está exatamente a meio caminho, dioptricamente falando, dos dois focos (linhas horizontal e vertical). Clinicamente, esta é a vergência mais importante.

O círculo de menor confusão (ou interfocal) é a imagem borrada (um ponto corresponde a um círculo), porém não distorcida.

4.5 - ALGUMAS PROPRIEDADES DOS CILINDROS

Há dois tipos de cilindros utilizados na oftalmologia: os cilindros positivo e negativo, conforme visto na figura 8. Ambos podem ser utilizados para a correção do astigmatismo.

A função⁷ que descreve o efeito das lentes cilíndricas nos vários meridianos é dada pela função seno ou co-seno, porém de período π .

5 - CORREÇÃO ÓTICA DAS AMETROPIAS

O modo pelo qual ocorre a refração de raios luminosos paralelos em um sistema astigmático já foi descrito. Em vez de um ponto focal isolado, existem duas linhas focais, separadas entre si por um intervalo focal. O comprimento desse intervalo focal é uma medida do grau de astigmatismo, e a correção do erro só é obtida reduzindo-se esses dois focos em um.

Se os dois meridianos principais do sistema astigmático estiverem em ângulos retos entre si, o erro pode ser corrigido pelo emprego de uma lente cilíndrica adequada, que, atuando no plano de um meridiano, modificará a refração dos raios que são dirigidos para um foco na mesma distância que aqueles do outro meridiano, quando então toda a imagem (teoricamente) transformar-se-á num ponto.

Vejamos, então, como proceder para a correção, por exemplo, de uma pessoa astigmática hipermélope composta, com +3di e +5di a 180° e 90°, respectivamente (figura 11a).

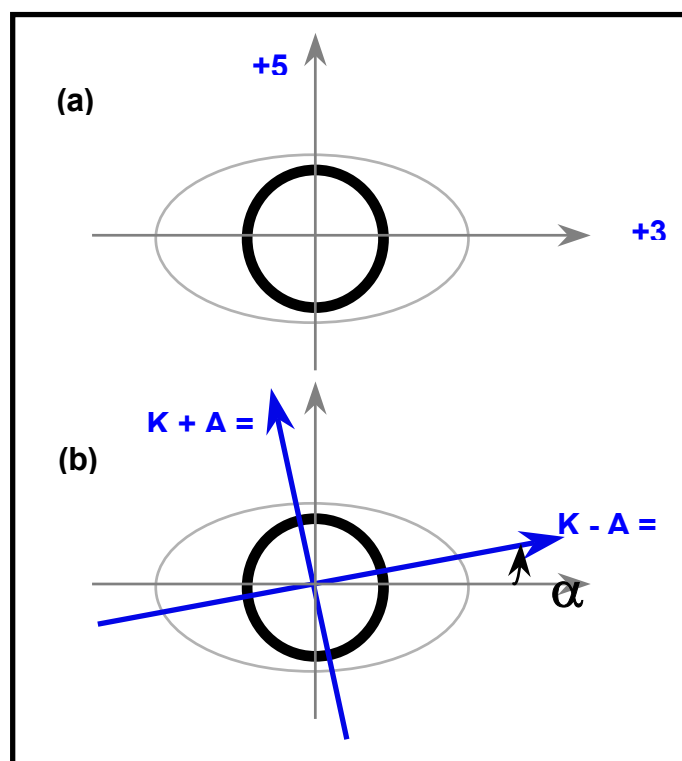


Figura 11: Representação da correção ótica de ametropia por lentes esféricas associadas a cilindros positivo e negativo: (a) exemplo particular de ametropia; (b) exemplo genérico de ametropia.

Há dois modos de prescrever a receita para este caso particular, com cilindros positivos ou negativos, este último tipo mais utilizado no Brasil (uma das razões é que é de mais fácil confecção):

$$+ 5 \text{ esf. } X - 2 \text{ cil. } 90^{\circ} \quad (1)$$

Coloca-se uma lente esférica +5di. Assim, ambos os meridianos submetem-se a +5di de poder, de modo que o vertical fica corrigido e o horizontal fica "super" corrigido, remanesecendo com -2di. Dessa maneira, devemos corrigir apenas este meridiano e, portanto, fazemo-lo com uma lente cilíndrica de -2di, com seu eixo de revolução na vertical (90°), a fim de que os raios verticais não sejam refratados.

Então, chegamos à prescrição final de uma lente esférica de poder +5di, combinada com uma lente cilíndrica de -2di a 90° .

$$+ 3 \text{ esf. } X + 2 \text{ cil. } 180^{\circ} \quad (2)$$

Procedendo da mesma maneira anterior, só que, agora, utilizando uma lente esférica de +3di, corrige-se o eixo horizontal, porém não totalmente o vertical, remanesecendo +2di que são corrigidos por um cilindro de poder +2di e posicionado a 180° para não interferir nos feixes luminosos horizontalmente incidentes.

Assim, concluímos que, uma vez determinados o maior e o menor poderes de refração de um olho, deve-se proceder do seguinte modo (figura 11b):

se $y > x$

$$y \text{ esf } X (x - y) \text{ cil } (\alpha^{\circ}) \quad (3)$$

ou

$$x \text{ esf } (y - x) \text{ cil } (\alpha^{\circ} + 90^{\circ}) \quad (4)$$

6 - ASTIGMATISMO - FORMALISMO MATEMÁTICO

Alguns livros da área da oftalmologia¹⁸ afirmam que o astigmatismo ocular pode ser expresso pela função seno elevada à primeira potência, através de deduções matemáticas, porém empiricamente, a expressão correta deve ser a expressão proporcional ao seno elevada à segunda potência.

Aqui neste capítulo é exposto o modo teórico e dedutível da expressão que descreve o astigmatismo ocular.

A figura 12 ilustra o gráfico de várias funções senos.

O astigmatismo ocular é descrito por uma função que possui as amplitudes máxima e mínima a 90° entre si. Além disto, é variável de 0 à 180° , ou seja, o poder de um determinado meridiano é o mesmo que o do meridiano complementar.

Observemos então, a seqüência da figura 12: a função seno de periodicidade 2π é graficada segundo o item (a); quando a deslocamos de K no eixo y temos o item (b); e quando a deslocamos de β no eixo x , temos o item (c).

Como mencionado acima, o astigmatismo é uma função de periodicidade π , descrito pelo item (d), e ainda deslocado nos eixos x - item (e) e y - item (f), uma vez que o início das medidas é definido como sendo pelo ponto de mínimo, ou seja, deslocado de $\beta=\pi/4$ - figuras 13.a e 14.a - no eixo x , e deslocado de K no eixo y , de modo que possa assumir qualquer valor (positivo ou negativo) entre os meridianos de 0 à $\pi/2$.

Denominando o eixo y como o poder de refração P e o eixo x como o ângulo de medida θ , temos:

$$P = A \sin(2\theta - \frac{\pi}{2}) + K \quad (1)$$

A expressão (1) descreve o astigmatismo ocular oblíquo, a favor da regra, onde o menor e o maior poderes estão a 0° e a 90° , respectivamente (veja figura 13.a).

Para um astigmatismo oblíquo, com menor $(K-A)$ e maior $(K+A)$ poderes a α° e a $(\alpha+90)^\circ$ - figura 12.b e figura 13.b -, respectivamente, temos a seguinte expressão:

$$P = A \sin(2\theta - \frac{\pi}{2} - 2\alpha) + K \quad (2)$$

ou ainda,

$$P = A \operatorname{sen}\left[2(\theta - \alpha) - \frac{\pi}{2}\right] + K \quad (3)$$

ou seja,

$$P = A [1 - 2 \operatorname{sen}^2(\theta - \alpha)] + K \quad (4)$$

Assim,

$$P = (K + A) - 2 A \operatorname{sen}^2(\theta - \alpha) \quad (5)$$

E portanto, chegamos à expressão (5), correspondente à expressão mencionada na figura 3, onde $(K+A)$ é a coordenada esférica (grau de miopia ou hipermetropia), $-2A$ é a coordenada cilíndrica (grau de astigmatismo) e α é o ângulo do eixo do astigmatismo. Observe que a lente cilíndrica corretora estará posicionada a $(\alpha+90)^\circ$.

Pela nomenclatura utilizada na figura 11.b, se denominarmos $y=K+A$ e $x=K-A$, temos:

$$P = y + (x - y) \operatorname{sen}^2(\theta - \alpha) \quad (6)$$

Para a nomenclatura da figura 3, $(k + A) = y = a$ e $2A = (x - y) = b$.
E portanto:

$$P = a + b \operatorname{sen}^2(\theta - \alpha) \quad (7)$$

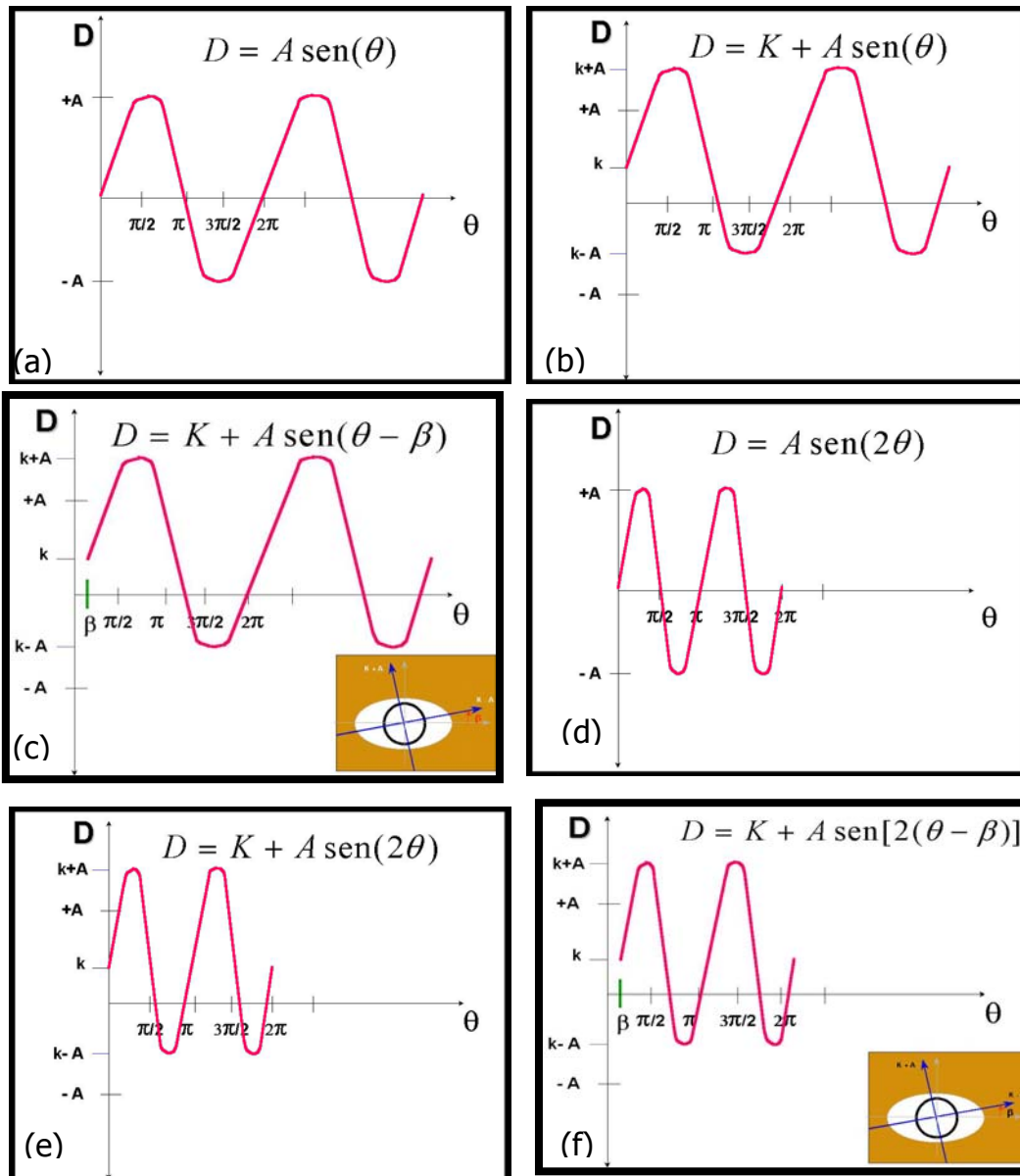


Figura 12: Representação das funções (em função do ângulo em radianos): (a) seno, com periodicidade 2π e com amplitude A ; (b) seno, de período 2π , com amplitude A deslocada de K no eixo y ; (c) seno, com periodicidade 2π , com amplitude A , deslocada de β no eixo x ; (d) seno, de período π , com amplitude A ; (e) seno, com período π , deslocada de K no eixo y ; (f) seno, com período π , deslocada de K no eixo y e deslocada de β no eixo x .

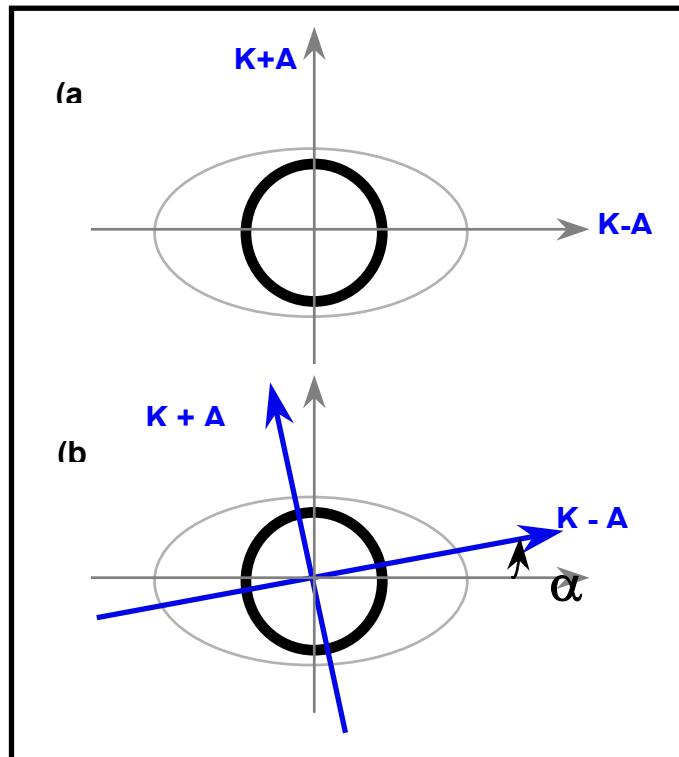


Figura 13: Representação da função do astigmatismo com eixo à (a) zero graus; (b) α graus.

7- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Hogan MJ, Alvarado JA, Weddell je, editors. Histology of the human eye. 1st ed. v. 1. Philadelphia: Saunders, 1971.
2. Duke-elder, editor. System of ophthalmology - The physiology of the eye and of vision. 1st ed. v. IV. Londres: Kimpton, 1968.
3. Duke-elder S, editor. System of Ophthalmology. – Ophthalmic Optics and Refraction 1st ed. v. V. Londres: Kimpton, 1970.
4. Duane TD, editor. Clinical ophthalmology. 2nd ed. v. 2. Hagerstown: Harper, 1978.
5. Albert DM, Jakobiec FA, editors. Principles and practice of ophthalmology: Basic Sciences. 1st ed. v. 6. Philadelphia: Saunders, 1994.

6. Thall EH, editor. Optics, refraction and contact lenses. 1st ed. v. 1. São Fco: Lifelong, 2000.

7. Michaels D, editor. Visual optics and refraction. 1st ed. v. 1. Saint Louis: Mosby, 1975.