



Brien Holden Vision Institute

ABERRAÇÕES E DESENHO DE LENTES

AUTOR

David Wilson: Brien Holden Vision Institute (BHVI), Sydney, Australia

REVISOR

Mo Jalie: Visiting Professor: University of Ulster, Varilux University in Paris

ESTE CAPÍTULO INCLUI UMA REVISÃO DE:

- Aberrações monocromáticas
- Aberração de frente de onda
- Aberração esférica
- Coma
- Astigmatismo Oblíquo
- Curvatura de Campo
- Distorção
- Aberração Cromática
- Desenho de lentes
- Redução de aberrações
- Curvas base

INTRODUÇÃO

Uma **aberração** é uma incapacidade da lente em fazer com que todos os raios incidentes se concentrem num ponto imagem.

Aberrações de Seidel (aberrações monocromáticas): Existem cinco aberrações que podem resultar da forma da lente (aberrações de Seidel).

Estas São:

- Aberração esférica
- coma
- Astigmatismo oblíquo
- Curvatura de campo
- distorção

A **aberração cromática** está relacionada com o número de Abbe e a potência da lente. Quanto mais baixo o número de Abbe maior a potência e mais notória é a aberração cromática.

As aberrações que provocam defeitos na imagem formada por um sistema óptico são principalmente as aberrações monocromáticas, isto é as aberrações que estão presentes quando a luz tem apenas um comprimento de onda. A aberração cromática causa um defeito nas propriedades de formação da imagem de um elemento óptico e é devida ao índice de refração do material da lente utilizada. Em circunstâncias normais, a luz de muitos comprimentos de onda irá incidir na lente ou no sistema de lentes. Assim, irá existir uma componente cromática para todas as aberrações monocromáticas.

ABERRAÇÕES MONOCROMÁTICAS

Eliminar a aberração cromática sugere que o sistema irá estar livre de aberrações. Existem no entanto, um número de aberrações que resultam de luz monocromática e estas são conhecidas como aberrações monocromáticas. Alguns livros também descrevem estas aberrações como Aberrações de Seidel ou como Aberrações de Terceira Ordem.

AS ABERRAÇÕES MONOCROMÁTICAS INCLUEM:

Aberração esférica, coma, astigmatismo oblíquo e curvatura de campo todas degradam a qualidade da imagem. Ao contrário das outras 4 aberrações de Seidel, a distorção deforma a imagem mas esta permanece nítida. As aberrações monocromáticas são aquelas que resultam de um único comprimento de onda.

PRESSUPOSTOS

Quando a luz passa através de uma lente são considerados uma série de pressupostos. O primeiro destes assume que a lente ou o sistema de lentes irá produzir um ponto imagem único e esférico quando a luz incidente é proveniente de um objecto único e esférico. De forma semelhante, se for considerada uma linha objecto a linha é considerada como sendo uma série de pontos objecto, todos eles formando pontos imagem perfeitos e reproduzindo integralmente o objecto como uma linha. A posição da imagem pode ser determinada usando o princípio dos focos conjugados, isto é, os raios paralelos incidentes na lente irão passar através do foco principal da lente da qual emergem.

Em adição, é assumido normalmente que os raios em consideração são paraxiais e o seno do ângulo de incidência é igual ao ângulo (em radianos). É por este motivo que os pressupostos são conhecidos colectivamente como a teoria paraxial ou teoria de primeira ordem.

Os pressupostos que têm sido feitos na teoria óptica paraxial são verdadeiros se for usada luz monocromática e os raios forem na realidade paraxiais. Quando é este o caso, os pressupostos têm um efeito insignificante na determinação da posição da imagem após a luz do objecto ter passado através da lente ou do sistema de lentes.

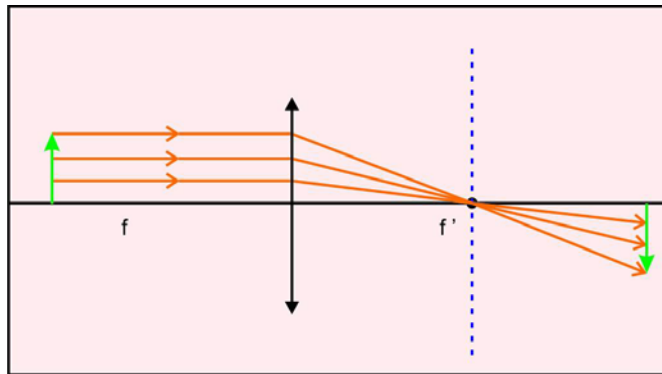


Figura 12.1: Refracção por raios de luz monocromáticos paraxiais

ABERRAÇÕES MONOCROMÁTICAS (cont.)

PRESSUPOSTO DE RAIOS PARAXIAL

O pressuposto paraxial determina que a distância AB é tão pequena que a distância AO e OB podem ser consideradas iguais. Por outras palavras, ao considerar as distâncias AO e OB como iguais, não irá afectar a nossa estimativa da posição da imagem. Esta estimativa funciona bem para raios paraxiais cujo ângulo de incidência θ é menor que cerca de 5° . A equação $L=F+L'$ fornece uma estimativa razoável da posição da imagem. No entanto, à medida que θ se torna maior que 5° , este pressuposto quebra-se e a utilização de equações de primeira ordem irá introduzir imprecisões significativas na localização da posição do objecto.

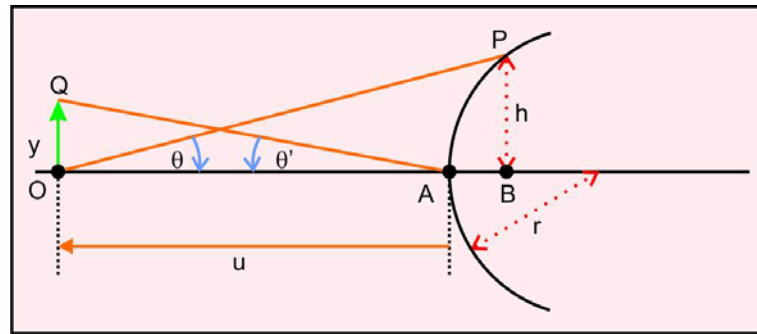


Figura 12.2: Pressuposto do raio paraxial

ISTO FUNCIONA NOS OLHOS?

A utilização do pressuposto paraxial afecta a nossa estimativa da posição da imagem nos olhos? O olho admite raios não-paraxiais (marginais) e tem um rácio de abertura relativamente grande. Isto deveria indicar que afetaria a estimativa. No entanto, a natureza asférica da córnea e as alterações no índice de refração à medida que a luz incidente passa através do olho irá contrariar isto em alguma medida. Os sistemas ópticos com lentes positivas elevadas, tais como aqueles empregues em faróis por exemplo, irão ser afectados de forma adversa pelo uso de um pressuposto paraxial.

O QUE QUEREMOS DIZER COM RAIOS MARGINAIS?

Os raios não paraxiais ou raios marginais são incidentes na área periférica da lente ou do sistema de lentes e são normalmente representados esquematicamente pelo seu raio principal. Os raios que caem algures entre os raios marginais e paraxiais são conhecidos como raios zonais. Quando incidente numa lente com superfície positiva, os raios marginais irão focar num ponto anterior ao foco dos raios paraxiais e mais perto do polo da lente, com os raios zonais a focarem-se algures num ponto intermédio.

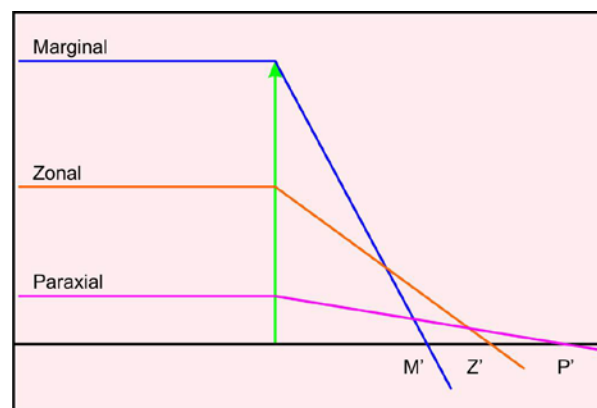


Figura 12.3: Focagem de vários raios

ABERRAÇÃO DE FRENTE DE ONDA

A teoria paraxial assume que a frente de onda emergente de uma lente ou de um sistema de lente é esférica. Normalmente, devido às aberrações, assume uma forma mais complexa que pode ser devido ao efeito de uma ou mais aberrações (Figura 12.4). Também pode ser observado que a aberração de frente de onda é mínima perto do eixo óptico e a frente de onda é quase esférica na forma. Isto explica, em parte, porque é que a teoria paraxial funciona bem para toda a luz incidente nestas regiões.

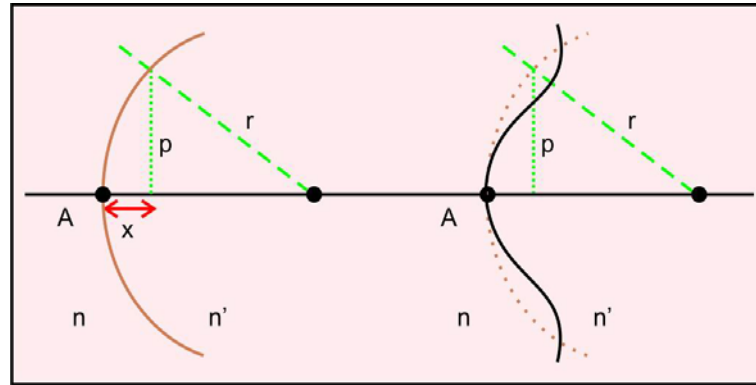


Figura 12.4: Aberração de Frente de Onda

ABERRAÇÃO ESFÉRICA

A aberração esférica, como representada na Figura 12.5, é criada quando os raios provenientes de um objecto axial são refractados na periferia da lente. Isto significa que um objecto está no eixo óptico ou os raios incidentes são paralelos ao eixo óptico. À medida que a distância dos raios incidentes do polo da lente aumenta, o nível de vergência dos raios emergentes também aumenta. Isto tem o mesmo efeito que se a lente tivesse aumentado a potência na direcção da periferia.

CAUSA	A aberração esférica é o resultado da refacção dos raios periféricos a qual é maior que o necessário para formar um ponto focal único. A aberração esférica pode ser medida como a distância entre o foco dos raios periféricos (M') e o foco dos raios paraxiais (P') medida ao longo do eixo principal (Figura 12.5). Isto é referido como aberração esférica longitudinal.
REDUÇÃO DA ABERRAÇÃO ESFÉRICA	Embora as lentes possam ser desenhadas para reduzir a aberração esférica (a consideração em muitos instrumentos ópticos), a aberração esférica não provoca grande preocupação para os usuários de óculos e fabricantes de lentes oftálmicas. Isto porque a pupila actua como uma abertura limitante, permitindo que apenas uma pequena parte da lentes seja usada num determinado momento.

ABERRAÇÃO ESFÉRICA (cont.)

ABERRAÇÃO ESFÉRICA TRANSVERSA OU LATERAL

A **aberração esférica transversa ou lateral** representa a diferença na distância perpendicular entre o limite do foco paraxial e o eixo óptico e o foco periférico. Na essência representa a diferença nos raios dos círculos de desfocagem. O círculo de desfocagem deveria ter um diâmetro que é proporcional ao cubo da altura do raio periférico.

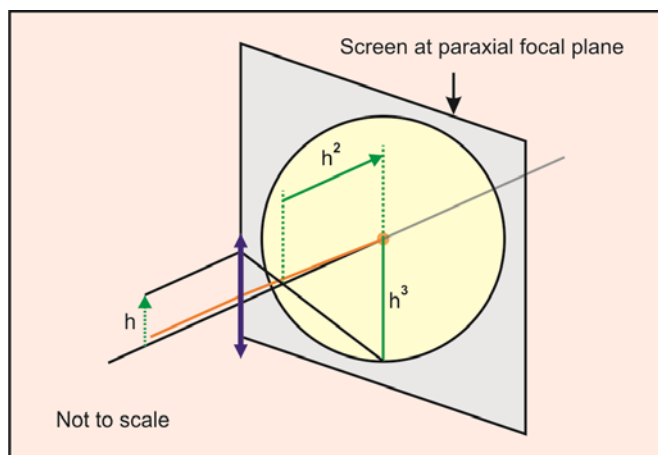


Figura 12.6: Aberração Esférica Transversa / Lateral

DESCREVENDO A ABERRAÇÃO ESFÉRICA

É aparente que a magnitude da aberração esférica pode ser expressa de diversas formas. Pode ser expresso como a diferença na vergência dos raios periféricos e paraxiais ou longitudinalmente como a diferença na distância axial do foco dos raios periféricos e paraxiais ou transversalmente como a diferença no tamanho dos círculos de desfocagem. Assim se a posição dos focos paraxiais e periféricos é conhecida, a magnitude da aberração esférica pode ser calculada de forma simples.

MAGNITUDE DA ABERRAÇÃO ESFÉRICA

Quando a pupila ou uma abertura está presente no sistema, pode limitar a extensão dos raios periféricos que entram no sistema, independentemente do tamanho da lente. Assim, a magnitude da aberração esférica longitudinal ou transversa é proporcional quer à altura do objecto ou ao raio da pupila.

SUMÁRIO DA ABERRAÇÃO ESFÉRICA

A aberração esférica (AE) não é um factor importante em lentes oftálmicas, uma vez que a pupila actua como uma abertura limitante e permite apenas que uma pequena parte da lente dos óculos seja usada num determinado momento. A visão pode ser comprometida à noite pela aberração esférica porque a pupila é maior. Desta forma manifesta-se como uma componente da miopia noturna, isto é, é sentido um desvio miópico em baixa iluminação. Isto é motivo de preocupação em jovens cujas pupilas são grandes e o aumento de AE do cristalino torna-se assim um factor importante. A AE deveria ser considerada em termos do seu efeito no campo de visão e dos seus efeitos prismáticos.

COMA

COMA

O coma surge quando os raios de um objecto que está fora do eixo óptico são refractados na periferia de uma superfície de refacção. O coma pode ser considerado uma aberração esférica fora do eixo óptico. Ao contrário da aberração esférica que ocorre ao longo do eixo óptico (AC na Figura 12.7), esta ocorre ao longo de uma eixo imaginário que passa através do ponto Q fora do eixo e do centro de curvatura C.

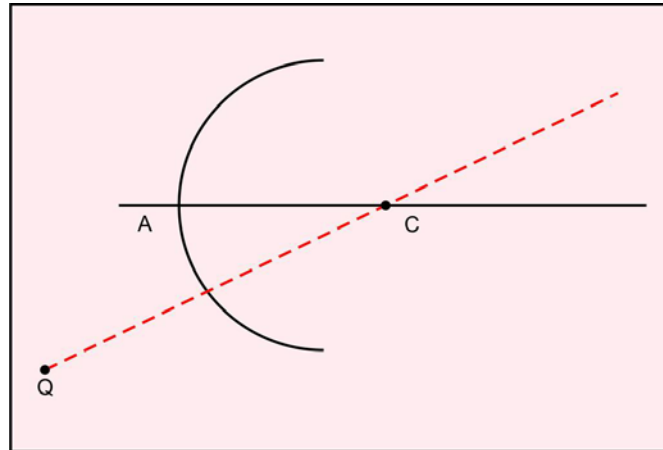


Figura 12.7: Coma

CAUSA

O coma pode ser também causado por uma refacção excessiva que ocorre na periferia da lente, no entanto aplica-se a luz que incide de forma oblíqua. De facto o coma é muitas vezes referido como aberração esférica para luz oblíqua.

REDUÇÃO DO COMA

Uma vez mais, embora as lentes possam ser desenhadas para reduzir o coma (uma consideração em muitos instrumentos ópticos), o coma é motivo de pouca preocupação para os usuários de óculos e para os fabricantes de lentes oftálmicas. Tal como a aberração esférica, a pupila actua como uma abertura limitante, permitindo que apenas uma pequena parte da lente seja usada de cada vez. A magnitude do coma aumenta em proporção ao quadrado do tamanho da pupila ou a altura do objecto medida a partir do eixo óptico.

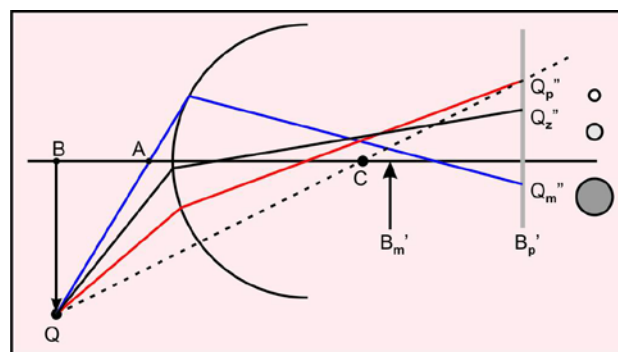


Figura 12.8: Redução do Coma

COMA (cont.)

REDUÇÃO DO COMA

O coma forma uma imagem em forma de cometa, a partir de uma fonte pontual, visto como um foco fino (Q_p'') na Figura 12.8 e Figura 12.9, que se estende para uma cauda menos intensa (Q_m'') em ambas as figuras. O coma tangencial é a extensão do coma $Q_p''O$ na Figura 12.9, enquanto o coma sagittal é o raio do círculo de desfocagem (Figura 12.9). O coma tangencial é normalmente 3 vezes o tamanho do coma sagittal. Isto é, três vezes mais longo do que largo.

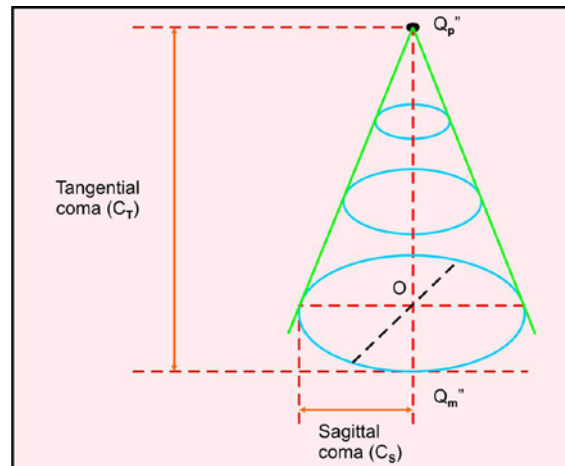


Figure 12.9: Representação Geométrica do Coma

ASTIGMATISMO OBLÍQUO

ASTIGMATISMO OBLÍQUO

O astigmatismo oblíquo surge quando pontos fora do eixo óptico são refractados perto do eixo óptico e a imagem é desfocada devido ao efeito astigmático resultante. O astigmatismo oblíquo é também conhecido como astigmatismo radial e marginal. O ângulo de incidência oblíquo faz com que o feixe de luz forme duas imagens em linha em duas localizações focais diferentes, separadas por um intervalo de Sturm, exactamente da mesma forma que o astigmatismo axial. A “zona imagem” representa a área da lente que é utilizada, isto é a parte da lente que não inclui os raios que são obstruídos pela pupila.

Em vez do feixe ser focado num ponto focal, forma duas linhas focais. Isto ocorre exactamente da mesma forma como se a formação da imagem fosse no eixo óptico devido a erro-refractivo, com a excepção das linhas focais serem formadas ao longo de uma eixo que é oblíquo ao eixo óptico em vez de ser sobre o eixo óptico.

Lembre-se que nós consideramos a presença de astigmatismo oblíquo na ausência de aberração esférica e coma. Estas duas aberrações iriam afectar a imagem ainda mais, mas por uma questão de simplicidade estas duas são consideradas como mínimas.

ASTIGMATISMO OBLÍQUO (Cont.)

PLANOS SAGITAL E TANGENCIAL

Considere os planos sagital e tangencial em conjunto (Figura 12.10).

As figuras foram exageradas por motivos de clareza. Os raios de luz incidente no plano sagital (perpendicular ao plano do papel) da área da imagem forma um ponto focal em Q_s' ao longo da linha de simetria Q_c . De igual forma, os raios de luz incidente no plano tangencial (no plano do papel) da área da imagem forma um ponto focal em Q_T' , novamente ao longo do eixo de simetria Q_c .

Se fosse colocado um ecrã no plano Q_T' , os raios que emergem do plano tangencial iriam estar focados e os raios que emergem do plano sagital iriam produzir uma linha focal horizontal. De igual forma se fosse colocado um ecrã no foco do plano sagital, Q_s' , os raios que emergem do plano tangencial iriam formar uma linha focal vertical. A separação das linhas focais é o intervalo de Sturm e descreve a magnitude do astigmatismo oblíquo.

O círculo de menor confusão (a posição de melhor foco) irá estar posicionado a meio da distância dióptrica entre Q_s' e Q_T' .

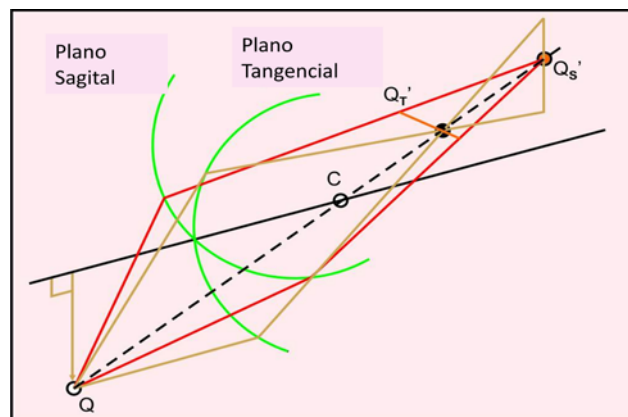


Figura 12.10: Planos Tangencial e Sagital

CONCHAS IMAGEM

Para uma série de objectos fora do eixo, irão ser produzidos dois conjuntos de imagens em linhas correspondendo uma ao foco tangencial e outra ao foco sagital. O conjunto de linhas correspondente a cada foco é normalmente conhecido como uma concha imagem. Pode ser visto na Figura 12.11 que a concha da imagem tangencial, é na maioria dos casos, anterior à concha da imagem sagital. Para uma linha objecto (BPQR) a imagem no foco tangencial irá passar por B_T' P_T' Q_T' R_T' e de igual forma, a imagem do foco sagital irá passar por B_s' P_s' Q_s' R_s' .

As conchas devem coincidir com o eixo óptico – não existe astigmatismo no eixo.

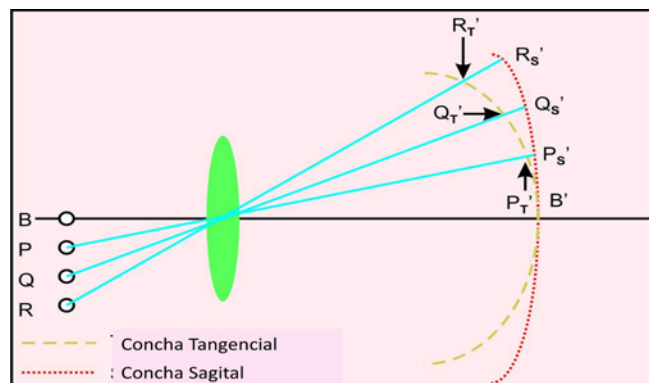


Figura 12.11: Conchas Imagem

ASTIGMATISMO OBLÍQUO (Cont.)

CONCHAS SAGITAIS E TANGENCIAIS

Para o objecto mostrado, considere a extremidade de cada seta. A Figura 12.12 mostra a aparência da imagem formada como se estivesse a ser observada num ecrã. Pode ser visto que as linhas tangenciais e sagitais são perpendiculares uma à outra.

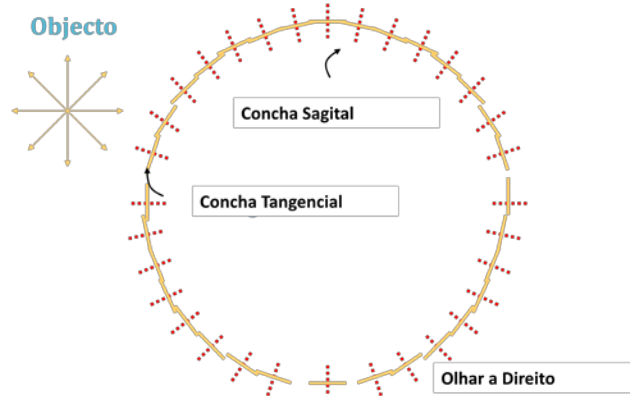


Figure 12.12: Conchas Sagitais e Tangenciais

CHAVENA E PIRES

Note que as conchas sagital e tangencial são separadas por motivos de clareza. Ao serem consideradas como um todo, a imagem formada faz lembrar uma chávena e um pires. O aro da chávena e o pires correspondem ao foco imagem da extremidade da seta no plano tangencial e sagital respectivamente. O fundo da chávena e a base do prato correspondem à imagens concha tangencial e sagital.

A superfície de Petzval que anteriormente foi referida irá interagir com as conchas imagem tangencial e sagital. Na maioria dos casos oftálmicos, as conchas de imagem tangencial e sagital irão cair em frente (isto é perto da lente) da superfície de Petzval. Pode ser demonstrado que a distância entre a superfície de Petzval e a concha imagem tangencial é três vezes a distância entre a superfície de Petzval e a concha da imagem sagital. O círculo de menor confusão o qual cai a meio das imagens concha tangencial e sagital está posicionado ao dobro da distância entre a superfície de Petzval e a concha imagem sagital. As distâncias reais irão depender da forma da lente.

CHAVENA E PIRES (cont.)

O objectivo do desenho de lentes oftálmicas é o de fazer com que os planos sagital e tangencial estejam os mais próximos possível de forma a minimizar o astigmatismo oblíquo. De forma semelhante, a superfície de Petzval irá ser ajustada para que esta coincida com a superfície retiniana para eliminar a curvatura de campo. No entanto, uma vez que ambas as aberrações são dependentes da forma da lente, na prática não é possível desenhar a lente que elimina quer o astigmatismo de incidência oblíquo quer a curvatura de campo. Com lentes de forma simples é feito um compromisso entre duas aberrações.

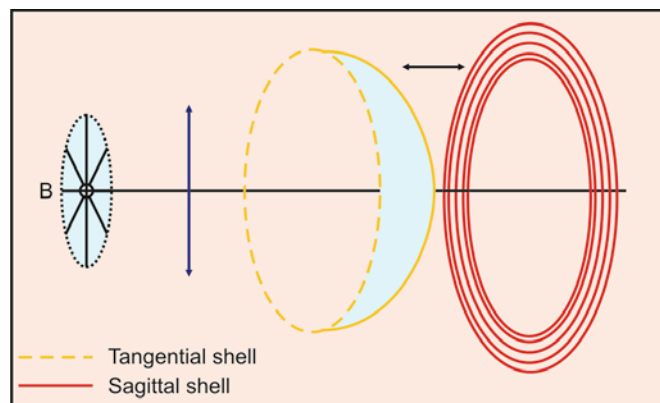


Figure 12.13: Chávena e Pires

ASTIGMATISMO OBLÍQUO (Cont.)

CONSIDERAÇÕES CLÍNICAS

Quais são as implicações clínicas do astigmatismo oblíquo? Mesmo que a aberração esférica e o coma fossem mantidos num mínimo, o astigmatismo oblíquo seria ainda um factor. A sua magnitude não é dependente do tamanho da pupilar, assim infelizmente não é minimizado de igual forma que a aberração esférica e o coma. A magnitude do astigmatismo oblíquo sentida pelo usuário de óculos irá ser dependente não apenas nas lentes, mas também da posição das lentes através da qual o paciente vê. Assim o astigmatismo oblíquo pode ser induzido pelo paciente ao olhar através de um ponto fora do eixo óptico da lente ou se a lente estiver inclinada respeitante ao eixo visual do paciente.

CÁLCULO DO ASTIGMATISMO OBLÍQUO

Considere este exemplo: uma paciente usa uma lente de +10.00D, a qual está inclinada 10° relativamente ao seu eixo visual. Através de experiência a posição das linhas focais horizontais e verticais iriam ser encontradas a 1mm 3 4.1 mm do foco esperado, se a lente não tivesse sido inclinada (100 mm).

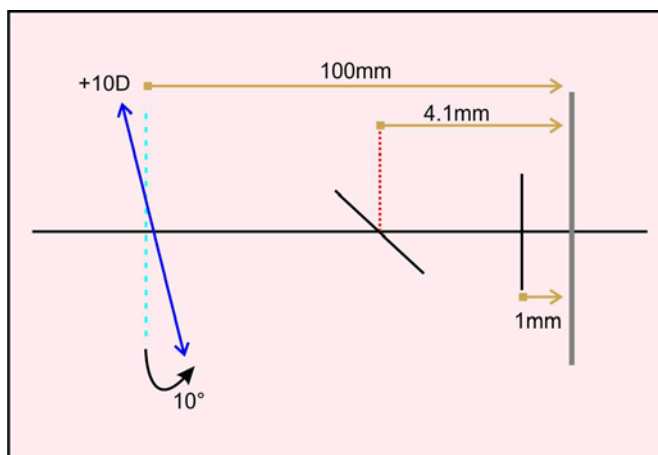


Figura 12.14: Cálculo do Astigmatismo Oblíquo

ASTIGMATISMO OBLÍQUO (cont.)

CÁLCULO DO ASTIGMATISMO OBLÍQUO (cont.)

A linha focal vertical é formada no foco do meridiano sagital (99 mm a partir da lente). Assumindo que a lente é fina, pode ser determinada a partir da fórmula $L + F = L'$ a potência efectiva do meridiano sagital que é de 10.10 D. De forma semelhante, a linha focal horizontal é formada no foco do meridiano tangencial (95.9 mm a partir da lente). Da mesma forma, pode ser determinada a potência no meridiano tangencial que é de +10.43 D. As cruzes de potência ajudam a determinar a prescrição efectiva que o paciente sente.

Equações Rápidas

Pode-se determinar o mesmo exemplo usando as seguintes equações (formula de Martin para a desfocagem). Estas equações fornecem a potência da nova esfera (F_{NS}) e o cilindro induzido (F_{IC}) para um ângulo com inclinação θ . Estas são usadas aquando da determinação da potência induzida por observação fora do eixo no meridiano vertical e horizontal. Por exemplo, a curvatura de contorno facial dos óculos pode induzir astigmatismo oblíquo se a lente for efectivamente inclinada em torno do eixo de 90° . A equação não fornece no entanto o eixo do cilindro induzido.

Fórmula de Martin para a Inclinação

A nova esfera, F_{NS} pode ser calculada a partir de

$$F_{NS} = F [1 + \sin^2 \theta / 2n]$$

O cilindro induzido, F_{IC} pode ser calculado a partir de

$$F_{IC} = F_{NS} \tan^2 \theta$$

Eixo do Cilindro Induzido

O eixo do cilindro induzido devido a observação fora do eixo óptico através da lente pode ser determinado na dimensão horizontal e vertical usando as regras simples que são listadas abaixo. Deve ser notado que o cilindro induzido é normalmente 3 vezes a mudança na esfera. A inclinação roda a lente em torno do eixo a 180° .

A curvatura de contorno facial ou inclinação dos óculos em torno do eixo a 90°

Eixo do cilindro induzido:

- Lente + em torno do eixo a 180° induz um cilindro + a 180°
- Lente - em torno do eixo a 180° induz um cilindro - a 180°
- Lente + em torno do eixo a 90° induz um cilindro + a 90°
- Lente - em torno do eixo a 90° induz um cilindro - a 90°

CURVATURA DE CAMPO

CURVATURA DE CAMPO

Por simplicidade, é assumido que apenas quando são considerados raios paraxiais, o plano imagem é formado do plano objecto (Figura 12.15). De facto, uma imagem curva irá ser formada para um plano objecto, mas a quantidade de curvatura é muito pequena quando são considerados apenas raios paraxiais. No entanto, quando os raios que não são paraxiais são considerados, a curvatura do plano imagem torna-se mais marcada.

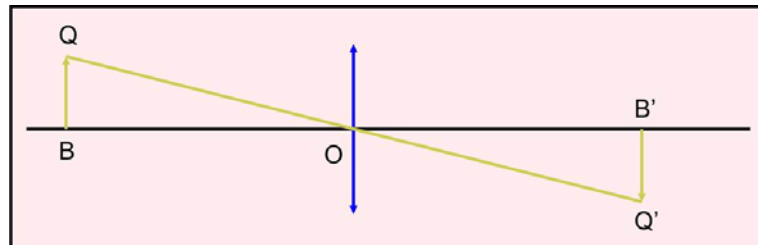


Figura 12.15: Formação de imagem do plano objecto

CAUSA

Na ausência de qualquer outra aberração a imagem de um plano objecto produzido por uma lente oftálmica irá ser curva. O plano da imagem curva é referido como a superfície de Petzval.

REDUÇÃO DA CURVATURA DE CAMPO

A curvatura de campo apresenta problemas para o fabricantes de objectos, em particular fabricantes de camaras que necessitam produzir uma imagem num filme plano. No entanto isto não é um problema significativo para os fabricantes de óculo da a forma curva da retina.

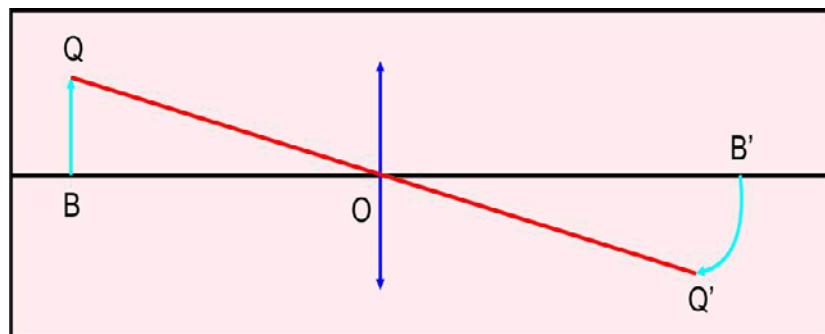


Figura 12.16: Formação da imagem devido à curvatura do campo

A superfície de Petzval é uma superfície livre de qualquer astigmatismo. Se fosse colocado um ecrã com a mesma curvatura na posição da superfície de Petzval, a imagem formada iria estar perfeitamente focada. No olho, porque a imagem é formada na retina a qual é uma superfície curva, a curvatura de campo não é tão problemática como nos instrumentos ópticos (exemplo: camaras). No olho, o requisito ideal para a superfície de Petzval, formada pela lente, é que esta seja coincidente com o ponto remoto da esfera do olho. Em adição, a posição ideal da superfície de Petzval deveria ser tal que o centro de curvatura seja coincidente com o centro de rotação do olho.

DISTORÇÃO

DISTORÇÃO

Sempre que está presente um anteparo num sistema óptico, a imagem é nítida mas distorcida, de forma que esta não é uma reprodução fiel do objecto. A imagem cai num único plano, mas os pontos marginais são deslocados do centro da imagem relativamente à sua posição no objecto. Quanto mais afastados estiverem os pontos marginais do centro do objecto (e do eixo óptico) mais eles estarão deslocados na imagem. A distorção positiva, também conhecida como distorção em barril, surge quando os pontos marginais da imagem estão deslocados na direcção do centro da imagem relativamente à sua posição no objecto. A distorção negativa, também conhecida como almofada de alfinetes, surge quando os pontos marginais da imagem são deslocados para longe do centro da imagem relativamente à sua posição no objecto, como se a imagem tivesse sido comprimida apenas pelos cantos.

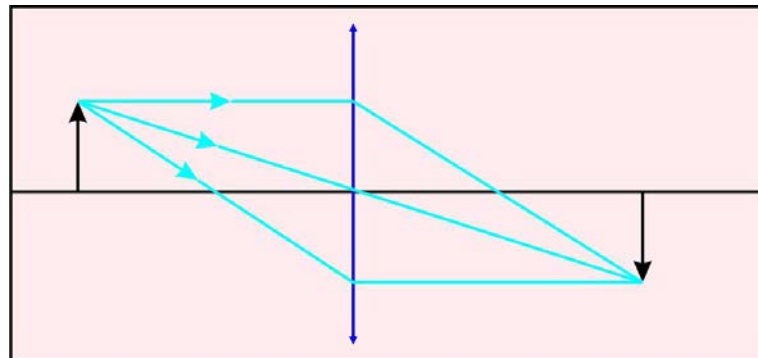


Figura 12.17: Traçado de raios sem abertura no sistema

A Figura 12.17 mostra o traçado de raios típico sem abertura num sistema. Todos os raios convergem para um foco comum e para simplicidade assume-se que não estão presentes outras aberrações.

DISTORÇÃO EM BARRIL

Na realidade, os raios não convergem para um foco comum. Os raios marginais são desviados mais que o ideal. Se a abertura for colocada em frente de uma lente oftálmica de potência positiva, os raios marginais superiores (desenhados como paralelos ao eixo óptico) irão ser eliminados deixando apenas os raios que passam através da foco principal anterior para formar a imagem. O resultado é, que na posição esperada da imagem, a imagem irá aparecer comprimida. Estes raios minificam a imagem porque a distância percorrida por estes raios no espaço objecto (l) é maior do que para os raios superiores. Assim, a partir de $L + F = L'$, a distância ao ponto de foco no espaço imagem irá ser menor que o esperado.

Uma vez que a magnificação pode ser expressa como L/L' , pode ser visto que a magnitude da magnificação irá ser reduzido, isto é, irá existir uma minificação da imagem. A distorção em barril faz com que a imagem apareça como se estivesse abaulada na direcção do observador.

A situação é invertida se a abertura for colocada em frente de uma lente negativa. Isto é, apenas os raios que fornecem uma imagem magnificada são permitidos que passem pelo sistema de lentes e é produzida uma distorção em almofada de alfinetes.

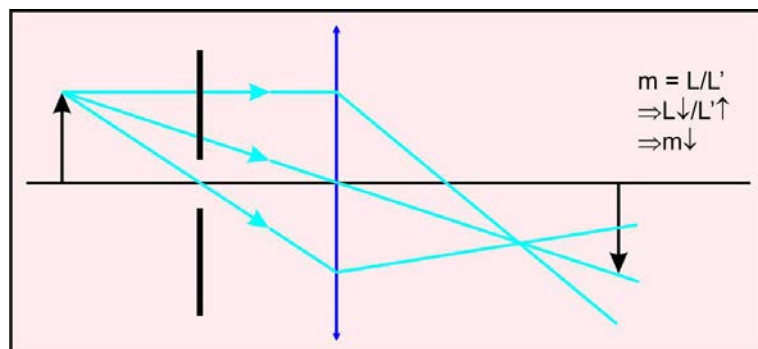


Figura 12.18: Traçado de raio com uma abertura anterior à lente num sistema de lentes

DISTORÇÃO (cont.)

DISTORÇÃO EM ALMOFADA DE ALFINETES

De igual forma como visto na distorção em barril, os raios marginais são desviados mais que o ideal. Se a abertura for localizada atrás da lente oftálmica positiva, os raios marginais inferiores (desenhados a passar pelo foco principal anterior) irão ser eliminados, deixando apenas que a imagem seja formada pelo raios paralelos ao eixo óptico. O resultado é, que na posição esperada da imagem, a imagem irá aparecer esticada. Estes raios magnificam a imagem porque a distância percorrida por estes raios no espaço objecto (l) é mais curta que o traçado de raios inferior. Assim, de $L + F = L'$, a distância ao ponto de foco no espaço imagem irá ser maior que o esperado. Uma vez que a magnificação pode ser expressa como L/l' , pode ser visto que a magnitude da magnificação irá ser incrementada, isto é irá existir uma magnificação da imagem. A distorção em almofada de alfinetes aparece como se estivesse abaulada para longe do observador.

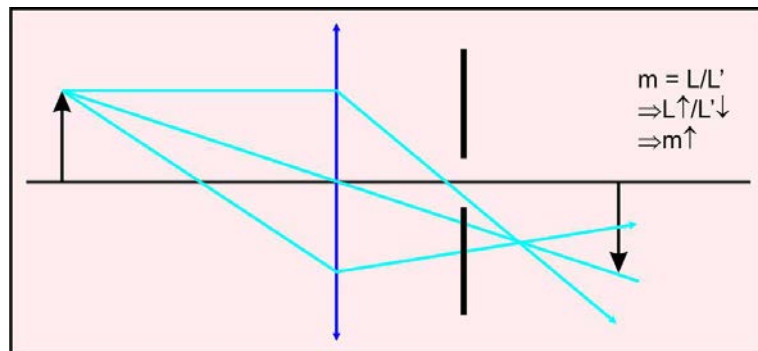


Figura 12.19: Traçado de raios com uma abertura atrás de uma lente positiva

ASPECTO DA IMAGEM

Clinicamente, a pupila do olho está posicionada atrás da lente oftálmica assim a pupila actua como uma abertura posterior à lente oftálmica, resultando na compressão (logo distorção em barril) com uma lente negativa e magnificação (logo distorção em almofada de alfinetes) com uma lente positiva. Tipicamente, os pacientes que usam lentes positivas e que sentem problemas com a distorção irão queixar-se de problemas ao localizar objectos. Os usuários de lentes negativas podem queixar-se de efeito em “aquário” nos bordos planos (exemplo: armações das portas) que irão aparecer abaulados afastando-se deles. A distorção não pode ser totalmente erradicada, mas apresenta-se principalmente como um problema apenas em lentes oftálmicas de elevada potência ou quando existe uma alteração significativa na forma da lente ou alteração de uma curva base tórica positiva para curva base negativa. Para usuários de lentes positivas de baixa potência, o astigmatismo oblíquo e a curvatura de campo irá apresentar mais dificuldades, se alguma. No caso de lentes correctivas pós cirurgia à catarata, a utilização de lentes com superfícies esféricas tem minimizado a distorção em grande medida.

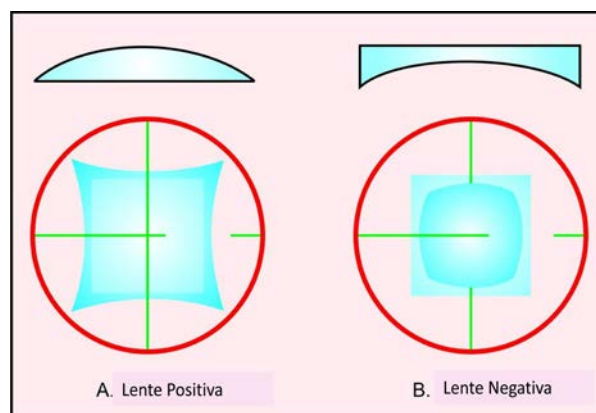


Figura 12.20: Distorção em almofada de alfinetes e barril provocadas por lentes positivas e negativas, respectivamente

ABERRAÇÃO CROMÁTICA

A aberração cromática induz desfocagem devido à separação de luz branca incidente nas comprimentos de onda que a constituem. O material da lente interage com cada comprimento de onda de forma diferente, resultando num ângulo variável de refração para cada comprimento de onda. Consequentemente, cada comprimento de onda irá ter um foco a uma distância específica da lente, ao longo do eixo óptico. A aberração óptica não existe para luz de um único comprimento de onda.

CAUSA

A aberração cromática ou cromatismo, surge como resultado de uma refração desigual dos vários comprimentos de onda da luz. Existem dois tipos de cromatismo, o cromatismo axial e o cromatismo transversal, discutido de forma breve anteriormente.

O cromatismo axial é criado por luz incidente normalmente onde a luz roxa forma um foco antes da luz vermelha com o restante espectro a estar espalhado entre ambos. Esta forma de cromatismo é de pouca importância para os usuários de óculos, muito em parte devido ao cromatismo axial do próprio olho.

A Aberração Cromática Transversa (ACT) é o resultado da maior refração dos comprimentos de onda mais curtos na periferia da lente. Pode ser medido como o efeito prismático em qualquer ponto (P) na lente dividido pelo número de Abbe (v) do material. Isto é:

$$ACT = P/v$$

O cromatismo está directamente relacionado com a potência da lente e inversamente relacionado com o número de Abbe do material da lente. Este ocorre em qualquer lente com potência e irá ser notório na direcção da periferia da lente. O cromatismo transversal menor que 0.1Δ é pouco provável que cause qualquer problema para o paciente, no entanto ACT significativamente mais elevado irá causar cromatismo que irá perturbar.

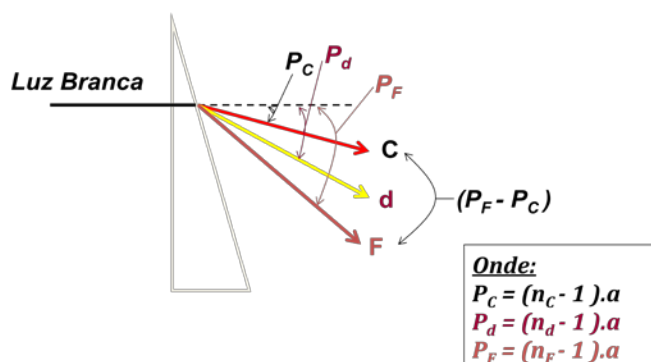


Figura 12.21: Desvio de diferentes comprimentos de onda

À medida que o comprimento de luz incidente no material da lente se torna mais curto, a luz é desviada mais quando encontra a interface entre, por exemplo, o ar e o vidro crown (Figura 12.21). A dispersão cromática de um material é expresso em termos do comportamento de três comprimentos de onda específicos quando a luz incide num dado material. Estes comprimentos de onda standard são conhecidos como linhas de Fraunhofer e o índice de refração pode ser determinado para cada comprimento de onda. O índice de refração do comprimento de onda amarelo (n_d) ocorre para um comprimento de onda de $\lambda=587.6\text{nm}$. De igual forma, o índice de refração definido pelos comprimentos de onda vermelho (n_C) e azul (n_F) ocorrem para comprimentos de onda de $\lambda=643.8\text{nm}$ and $\lambda=480\text{nm}$, respectivamente. Se luz branca for direccionada para um prisma com ângulo apical conhecido, pode ser determinada a magnitude do desvio de cada comprimento de onda. A diferença angular entre o desvio medido para os comprimentos de onda vermelho e azul ($P_F - P_C$) representa a magnitude da aberração cromática angular ou transversal. Na essência representa a diferença na magnitude da imagem à medida que o comprimento de onda diminui. O índice de refração de uma lente é indicado pela linha de Fraunhofer.

ABERRAÇÃO CROMÁTICA (cont.)

POTÊNCIA DE DISPERSÃO	<p>A potência de dispersão representa a diferença entre os índices de refração determinados para os comprimentos de onda azul e vermelho normalizado ao comprimento de onda amarelo. A aberração cromática transversa (ACT) pode ser expressa em termos da potência de dispersão e da potência prismática. Nesta expressão, o valor P_d é tido como a potência prismática marcada na lente.</p> <p>Tal como demonstrar a ACT em termos de potência de dispersão, também é expressa em termos de constringência. A constringência é o recíproco da potência de dispersão. Os valores da potência de dispersão tendem a ser muito pequenos assim os valores da constringência são normalmente usados ao descrever as propriedades cromáticas da lente.</p> <p>Potência de Dispersão ou Dispersão Relativa (ω)</p> $\omega = n_F - n_C n_d - 1$ <p>Se a dispersão angular de um prisma fino for dada por:</p> $P_F - P_C = [(n_F - 1) \cdot a] - [(n_C - 1) \cdot a] = [(n_F - n_C) \cdot a]$ <p>Uma vez que: $a = P_d / (n_d - 1)$</p> <p>A Aberração Cromática Transversa (Dispersão Angular)</p> $= \omega \cdot P = P / \nu$
ABERRAÇÃO CROMÁTICA TRANSVERSA	<p>Os valores mais amplos da constringência indicam que o material da lente tem menos tendência a separar a luz branca nos seus comprimentos de onda constituintes. A ACT, expressa em dioptrias prismáticas, pode ser expressa em termos da potência de uma lente e a distância ao ponto de interesse a partir do centro óptico.</p> <p>Uma lente pode ser considerada, a partir do centro à periferia da lente, como uma série de prismas em miniatura com aumento progressivo do ângulo apical, isto é, a luz incidente na periferia irá ser desviada numa maior quantidade que a luz incidente perto do centro da lente. Assim, na periferia da abertura da lente, o prisma tem maior potência de desvio e da fórmula para a ACT pode ser visto que isto irá dar a magnitude máxima da ACT.</p> <p>Valor $-\nu$ é o inverso da dispersão relativa P (também P_d) é a potência prismática desejada</p> <p>Uma vez que a regra de Prentice</p> $P = c \cdot F$ <p>Onde c são os centímetros de descentramento e F é a potênciadíóptrica,</p> <p>ACT pode ser expressa como: $ACT = (c \cdot F) / \nu$</p> <p>A ACT máxima ocorre para o raio limitante na abertura.</p>

ABERRAÇÃO CROMÁTICA (cont.)

ABERRAÇÃO CROMÁTICA LONGITUDINAL

A aberração cromática longitudinal (ACL) representa a distância entre os focos axiais dos comprimentos de onda azul e vermelho.

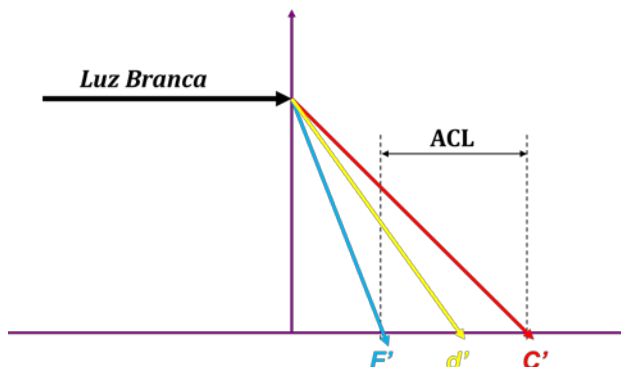


Figura 12.22: Aberração cromática longitudinal

Enquanto a ACT foi expressa em dioptrias prismáticas e foi representada pela diferença no desvio angular dos comprimentos de onda de Fraunhofer vermelho e azul, a ACL é expressa em Dioptrias

Uma vez que, $F = (n - 1) \cdot R$

$$\therefore F_F = (n_F - 1) \cdot R$$

$$\therefore F_C = (n_C - 1) \cdot R$$

NB: R = raio de curvatura da lente.

A ACL é dada pela diferença entre os raios focos axiais das linhas azuis e vermelhas, isto é:

$$F_F - F_C = (n_F - 1) \cdot R - (n_C - 1) \cdot R = (n_F - n_C) \cdot R$$

A ACL pode ser também expressa em termos da potência de dispersão ou de constringência do material da lente. A expressão final é semelhante à da ACT, excepto que a distância do ponto de interesse (exemplo: o raio marginal) ao centro óptico não é tida em conta.

Uma vez que a curvatura está relacionada por:

$$R = F / (n_d - 1)$$

Assim a ACL (em dioptrias) é dada por:

$$ACL = F_F - F_C = (n_F - n_C) \cdot R = (n_F - n_C) \cdot [F / (n_d - 1)]$$

$$ACL = \omega \cdot F = F / v$$

ACL EM LENTES OFTÁLMICAS

[Exemplo de Cálculo]

Considere a ACL de uma lente de vidro crown típica de potência +5.00 D, com um valor- v de 60.

$$ACL = f/v$$

$$ACL = 5/60$$

$$ACL = 0.09 \text{ D.}$$

A magnitude da ACL é relativamente pequena e irá aumentar à medida que a potência das lentes oftálmicas aumenta. No entanto, o olho humano tem uma grau de inerente de ACL. A magnitude de ACL no olho é dependente da idade do paciente e irá ser maior em gente mais jovem, de aproximadamente 2.00 D. À medida que o olho envelhece, o cristalino absorve luz azul e a magnitude da aberração cromática reduz-se para ~0.50 D. Assim, a magnitude da ACL induzida por uma lente oftálmica é pequena com respeito àquela inerente à do olho.

DESENHO DE LENTES

O objectivo dos fabricantes de lentes é o de reduzir ou eliminar os efeitos de várias aberrações da forma e material das lentes. Inevitavelmente requer compromisso dado que eliminar uma aberração pode afectar outra de forma adversa. Os fabricantes, por exemplo, não conseguem produzir uma lente com um ponto focal (corrigindo o astigmatismo oblíquo) e também eliminar a curvatura de campo. Como resultado, os fabricantes pesam as aberrações em termos significado para usuários de óculos.

MINIMIZAÇÃO DO ASTIGMATISMO OBLÍQUO

Elipses de Tscherning

O astigmatismo oblíquo é o que causa mais problemas para usuários de lentes oftálmicas e é o foco de atenção para os fabricantes de lente oftálmicas. No virar do século XIX as elipses de Tscherning, asquais representam curvas ideais para eliminar astigmatismo oblíquo, provaram ser um desenvolvimento significativo no desenho de lentes oftálmicas.

Se forem usadas lentes com forma esférica, existem duas combinações de curvas que irão produzir lentes com imagens pontuais as quais foram mencionadas previamente, isto é, lentes livres de astigmatismo oblíquo. Estas curvas são representadas num gráfico, Figura 12.23, que mostra a curva posterior necessária para várias potências de lentes e as curvas tomam a forma de uma elipse conhecida como elipse de Tscherning. Irão existir elipses diferentes para diferentes tipos de material e distâncias ao vertex etc. A metade exterior da elipse, a mais potente das alternativas, é referida como a forma de Wollaston e forma mais plana a forma de Ostwalt.

As lentes desenhadas de acordo com os princípios das elipses de Tscherning são referidas como sendo as lentes com a melhor forma. Em lentes não-asféricas estas lentes são usadas na maioria dos países.

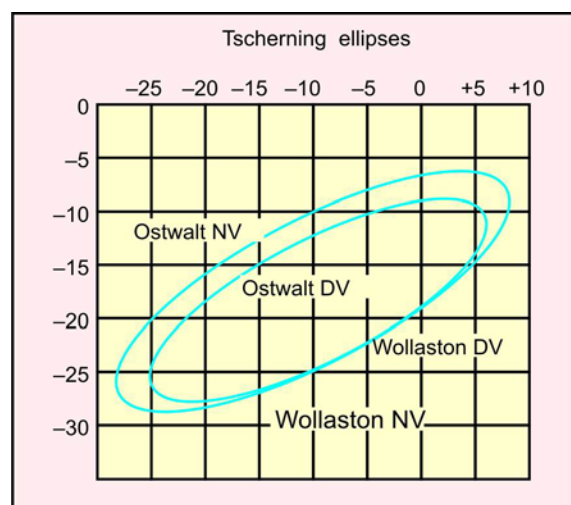


Figura 12.23: Elipses de Tscherning

REDUÇÃO DE ABERRAÇÕES

MINIMIZAÇÃO DO ASTIGMATISMO OBLÍQUO (SUMÁRIO)	<p>Tal como já sabe, as lentes de forma esférica é a forma preferida de reduzir o astigmatismo oblíquo. Em vez de seleccionar curvas que evitam a aberração, elas neutralizam directamente a potência astigmática criada pela incidência fora do eixo. As curvas esféricas permitem obter lentes com formas mais planas, mais atractivas, que a menos que a aberração fosse neutralizada iriam criar uma quantidade considerável de astigmatismo. A alteração relativa de potências dos planos tangencial e sagital irá neutralizar directamente o astigmatismo marginal. Isto irá ser discutido em maior detalhe numa aula mais avançada.</p>
MINIMIZAÇÃO DA CURVATURA DE CAMPO	<p>Na ausência de qualquer outra aberração, a imagem de um objecto plano produzida por uma lente oftálmica irá ser curva. O plano da imagem curva é conhecido como superfície de Petzval. O erro de curvatura em lentes oftálmicas é expresso como a erro oblíquo médio (EOM) e é eliminado usando as formas da lentes de Percival.</p> <p>A curvatura do campo apresenta problemas para os fabricantes de instrumentos, em particular fabricantes de camaras que necessitam produzir uma imagem num filme plano. Isto não é um problema significativo, para os fabricantes de lentes oftálmicas dada a forma curva da retina. A superfície de Petzval é a superfície imaginária nas quais as conchas tangenciais e sagitais colapsam na ausência de astigmatismo oblíquo.</p> <p>Um ecrã com a mesma curvatura irá apenas receber imagens nítidas na ausência de astigmatismo oblíquo. A condição para uma lente oftálmica ser livre de curvatura de campo (erro oblíquo médio) é que os discos de menor confusão dos feixes astigmáticos caiam na esfera de ponto remoto.</p>
MINIMIZAÇÃO DA DISTORÇÃO	<p>A distorção afecta a forma da mas não a claridade da imagem. Para usuários de lentes positivas a periferia das lentes irá magnificar a imagem mais que a área paraxial resultando numa distorção em almofada de alfinetes. Isto é, os cantos de um objecto quadrado irão ser magnificados e o objecto irá ter a aparência de uma almofada de alfinetes. Os usuários de lentes negativas têm um efeito oposto.</p> <p>A periferia da lente produz uma magnificação menor que 1 e assim os objectos apresentam uma forma em barril. Os pacientes podem queixar-se de efeito em aquário. A distorção é apenas um problema para usuários de lentes de elevada potência ou onde existe uma alteração significativa na forma da lente.</p>

REDUÇÃO DE ABERRAÇÕES (cont.)

MINIMIZAÇÃO DA ABERRAÇÃO CROMÁTICA

O cromatismo está directamente relacionado com a potência da lente e o número de Abbe do material da lente. A forma mais simples de reduzir a aberração cromática é usando um material com um número de Abbe superior. No entanto, se um material de Abbe inferior for desejável por outros motivos é ainda assim possível reduzir os efeitos da aberração cromática transversa.

Embora a potência da lente seja fixa podemos tentar reduzir a aberração cromática transversa através da redução do efeito prismático. Isto é movendo a linha do olhar para mais perto do centro óptico. Isto pode ser alcançado por:

Reduzindo a distância ao vértice posterior

Assim, para uma dada direcção do olho, o paciente irá olhar através de um ponto na lente perto do centro óptico.

Aumentando do contorno facial

Isto tem o mesmo efeito mas num grau menor.

Reduzindo o tamanho da ocular

Isto impede a utilização de áreas da lente com maior efeito prismático (Figure 12.24).

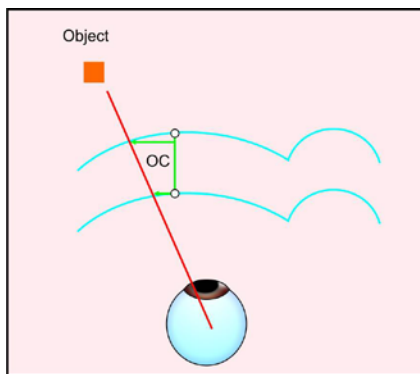


Figura 12.24: Efeito da redução do tamanho da ocular no efeito prismático

CURVAS BASE

PERCEPÇÕES DO PACIENTE

Enquanto a prescrição pode ser efectuada num número qualquer de formas de lentes, as percepções do paciente quando usam as diferentes formas irão variar. Deve-se ter cuidado ao efectuar pedidos de lentes com uma curva base diferente do par anterior. Isto não significa que a nova forma não pode ser usada, mas simplesmente que o paciente deve ser avisado que pode esperar uma sensação diferente durante um curto período de tempo.

PARES MÚLTIPLOS

Combinar as curvas base é particularmente importante ao pedir vários pares. Enquanto o paciente irá habituar-se a uma nova curva base durante um período de tempo, ele irá sentir as modificações entre curvas base desconfortáveis.

ALTERAÇÃO DOS TIPOS DE LENTE

Combinar as curvas base pode não ser uma opção em alguns casos. Se o paciente for mudado para um novo tipo de lentes, por exemplo, para um novo desenho de lente progressiva que não está disponível na sua curva base antiga, então a alteração na curva base é inevitável. Em tal caso, o paciente necessita ser avisado que o novo par de óculos irá necessitar de uma adaptação e isto é normal.

SUMÁRIO

Nos capítulos anteriores foram analisados os requisitos das lentes oftálmicas para produzirem a imagem de um ponto esférico no olho. Foram tomados alguns pressupostos para limitar a complexidade das lentes e refração reais. Se estes pressupostos forem esquecidos verificamos que as lentes são afectadas por um número de aberrações. No entanto, com uma escolha cuidadosa das curvas ou do desenho da lente é possível limitar estas aberrações.

BIBLIOGRAFIA

Jalie M. 2003. *Ophthalmic Lenses and Dispensing*. Butterworth Heinemann, London.

Jalie M. 1984. *Principles of Ophthalmic Lenses*, ABDO, London.

Wakefield KG and Bennet AG. 2000. *Bennett's Ophthalmic Prescription Work*, Butterworth-Heinemann.

Brooks CW and Borish IM. 2006. *System of Ophthalmic Dispensing*. Butterworth Heinemann.

Brooks CW. 2005. *Essentials of Ophthalmic Lens Finishing*. Butterworth-Heinemann.

Wilson D. 2006. *Practical Optical Dispensing 2nd Edition*. Open Training and Education Network, Sydney.

Wilson D and Stenersen S. 2002. *Practical Optical Workshop*. Open Training and Education Network, Sydney.