

ÓPTICA - 8

(21)

COMPLEMENTOS DE ÓPTICA

GEOMÉTRICA.

Vamos começar pelas aberrações, e depois da frequência vamos até falar de lentes espessas.

→ ABERRAÇÕES

Como se deve lembrar, estamos até este momento a utilizar a aproximação paraxial. Os desvios da realidade em relação a esta aproximação chamam-se aberrações.

Existem dois tipos principais de aberrações:

- Cromáticas (pois n depende da frequência (ω))
- Monocromáticas (que podem ser de dois subgrupos; as tonais e as que distorcem a imagem pouco nítida, e as que a distorcem)

De referir-se que a correção das aberrações é uma das áreas de maior complexidade no desenho de sistemas ópticos, pois envolve a otimização da forma das lentes, das suas posições e das distâncias, quer das lentes quer das diafragmas. Hoje em dia esse tarefa é normalmente "confiada" a computadores, usando o tracado de raios (que iremos ver depois da frequência) que pode ser tratado de forma matricial. Normalmente esses programas partem de uma configuração base, escolhida pelo utilizador, e vão otimizando essa configuração, de modo a se aproximarem dos parâmetros especificados pelo utilizador. A configuração final não será a ideal, mas será "suficientemente boa" para o que se pretende.

Aberrações Monocromáticas

Até agora usamos apenas o 1º termo da expansão da função seno:

$$\text{Sen } \varphi = \varphi - \frac{\varphi^3}{3!} + \frac{\varphi^5}{5!} - \frac{\varphi^7}{7!} + \dots$$

Esta é a aproximação proximal (de 1ª ordem).

Para raios qe n3 estejam próximos do eixo óptico torna-se necessário considerar aproximações mais rigorosas. Se utilizarmos a aproximação de 3ª ordem:

$$\text{Sen } \varphi = \varphi - \frac{\varphi^3}{3!}$$

Os desvios desta aproximação, relativamente à aproximação de 1ª ordem dão origem a 5 aberrações primárias:

- Esférica; Coma; Astigmatismo; Curvatura de Campo e Distorsão.

(Por vezes são chamadas de Aberrações de Seidel).

Naturalmente se considerassemos raios de ordem superior teriamos ainda outros tipos de aberrações. Mas vamos ficar apenas pe estas 5 primárias:

- Ab. Esférica:

Vimos qe no regime paraxial temos:

$$\frac{n_1}{s_o} + \frac{n_2}{s_i} = \frac{n_2 - n_1}{R}$$

Se considerarmos a aproximação de 3ª ordem:

$$\frac{n_1}{s_o} + \frac{n_2}{s_i} = \frac{n_2 - n_1}{R} + h^2 \left[\frac{n_1}{2s_o} \left(\frac{1}{s_o} + \frac{1}{R} \right)^2 + \frac{n_2}{2s_i} \left(\frac{1}{R} - \frac{1}{s_i} \right)^2 \right]$$

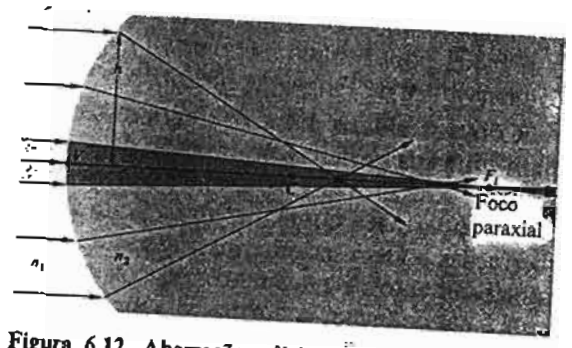
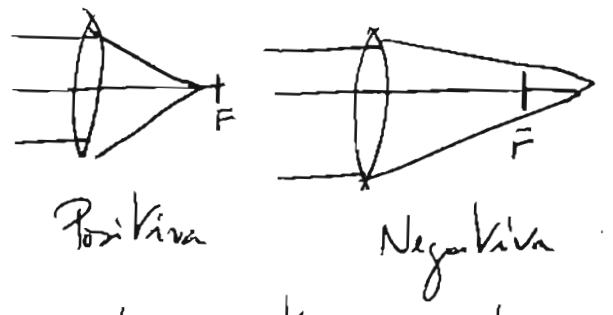
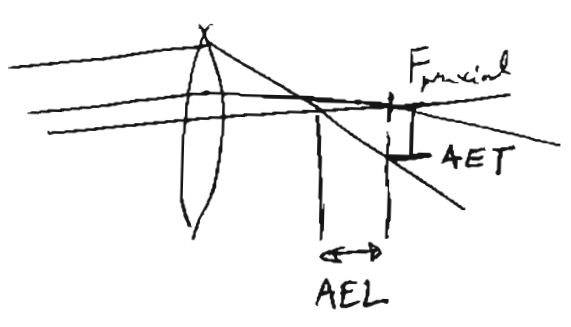


Figura 6.12 Aberração esférica na refração num dióptro único.

basicamente, o que vemos é uma dependência da distância focal com a "altura" dos raios no praxiais.

Note-se que a aberração esférica se refere unicamente a objetos pontuais situados sobre o eixo óptico.

A distância entre o ponto focal paraxial e o ponto de interseção de um raio é a Ab. esférica longitudinal



A AEL pode ser positiva ou negativa.

Note-se que neste caso (com esta aberração) o ponto focal deixa de ser um verdadeiro ponto. Torna-se uma "mancha". Ou seja a Ab. esférica reduz o contraste e degrada a imagem. (esconde os detalhes).

[A distância entre o eixo e o ponto em que um raio incide no alvo tem o nome de Ab. esférica transversa (AET)] ⑤

Note-se que existe uma posição em que o diâmetro da mancha luminosa é mínimo. Trata-se do Círculo de Confusão Mínima, que será normalmente o melhor ponto para se observar a imagem.

Uma solução para reduzir a ab. esférica é limitar os raios que entram no sistema (com um diafragma). Mas nesse caso estamos a reduzir a luz que entra.

De referir que para uma dada abertura e distância focal, a ab. esférica varia com a distância objecto e a forma da lente. Ou seja, é possível, jogando com a forma da lente) reduzir a ab. esférica, por exemplo:

EH 6.14
Corrigir!!

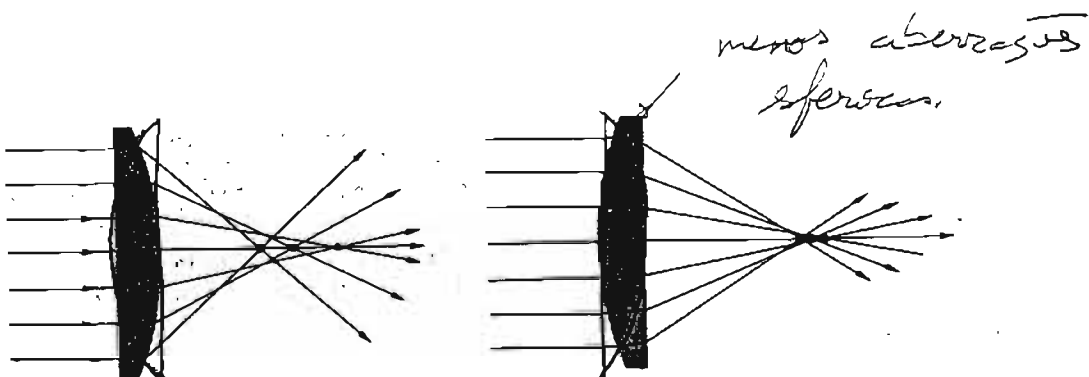


Figura 6.14 Aberração esférica para uma lente plano-convexa.

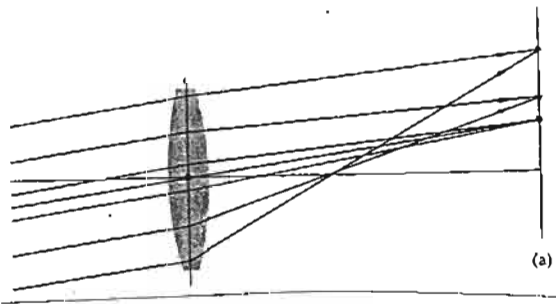
Para dois pontos conjugados específicos é possível desenhar ⁽⁶⁾ lentes esféricas x ab. esférica (sacrificando outros pontos que serão mais afectados).

— Coma

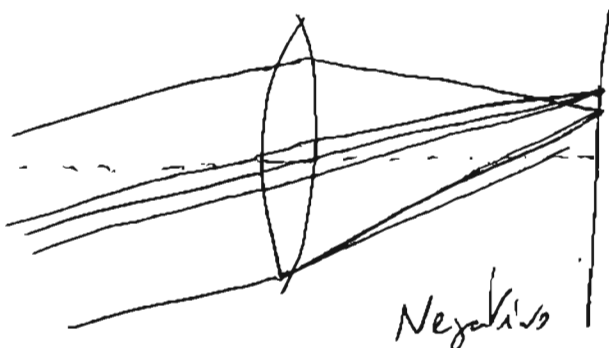
Afecta pontos a imagem de pontos no x -axis, apesar de próximos do eixo, e resulta do facto dos planos "focais" não serem verdadeiramente planos (apesar na aproximação paraxial poder ser considerados planos).

Logo a distância focal "efectiva" varia qdo x consideramos raios que atravessam a lente em pontos não axiais:

6.18.



Positivo



Negativo

Os raios que incidem na periferia da lente são feitos convergir no plano mais ^{longe} ~~próximo~~ do que raios que incidem no centro da lente.

Coma positivo

(Se for mais perto é Coma negativo)

O coma depende da forma da lente, tal como a ab. esférica. Daí se possa ser reduzido, para um dado conjunto de S_o e S_i , através do "desenho" de lentes adequadas. De referir que essas lentes são adequadas para esses pontos, ~~mas~~ mas não necessariamente para outros.

Outro ponto importante é que o coma tb pode ser reduzido através da colocação de um diafragma. Além de neste caso não só a abertura, mas também a posição do diafragma é importante!

6.21

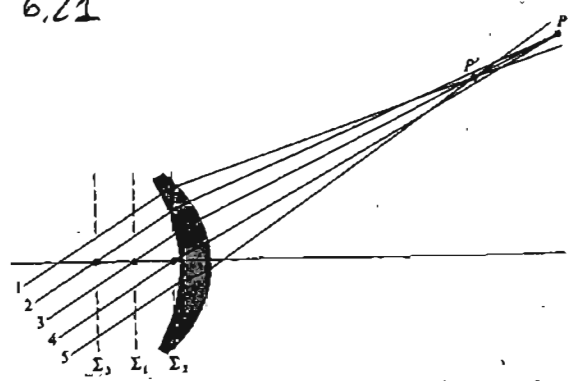


Figura 6.21 Efeitos da localização do diafragma sobre o coma.

- Astigmatismo

Tal como no nosso olho, o astigmatismo resulta de uma lente, segundo planos diferentes, apresentar distâncias focais diferentes.

De notar no entanto que este não é nenhum defeito da lente, mas sim uma consequência da geometria.

Assim, no plano Meridional (definido pelo eixo óptico e pelo ponto objecto), a lente vai ter uma distância focal, e no plano sagital (definido pelo

~~raio principal~~ e perpendicular ao plano meridional) a lente vai ter outra distância focal.

(Isso ocorre os raios nesse plano chegam à lente com inclinações diferentes).

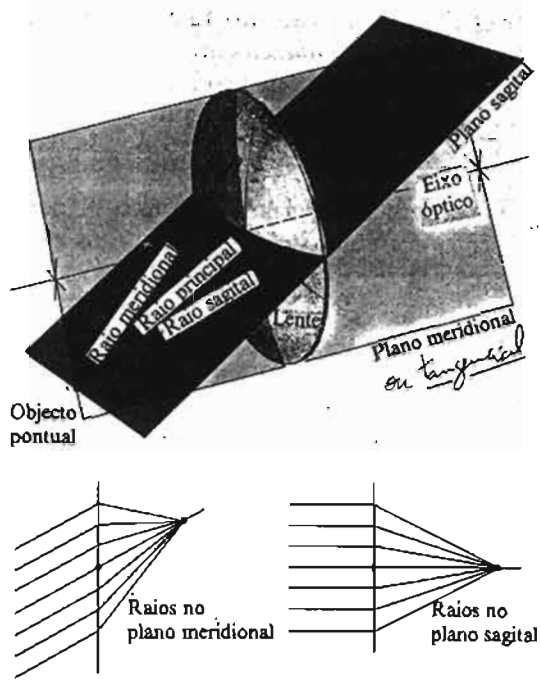


Figura 6.22 Planos sagital e meridional.

Pode-se demonstrar que a diferença entre essas distâncias focais depende da "potência" da lente, mas não da sua forma.

Considerando um feixe cônico à entrada, devido às 2 distâncias focais, ele vai-se transformar num feixe elíptico!

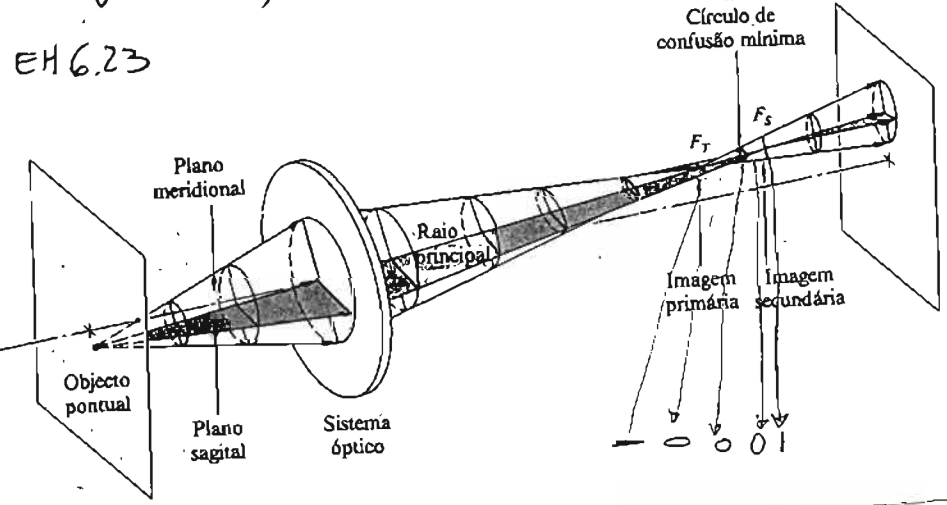


Figura 6.23 Astigmatismo.

Esse feixe "colapsa" para traços nas distâncias focais meridionais e sagitais.

- Curvatura de Campo (ou Curvature de Petzval)

Como já referimos os planos objeto e imagem só são planos na aproximação paraxial.

6.25

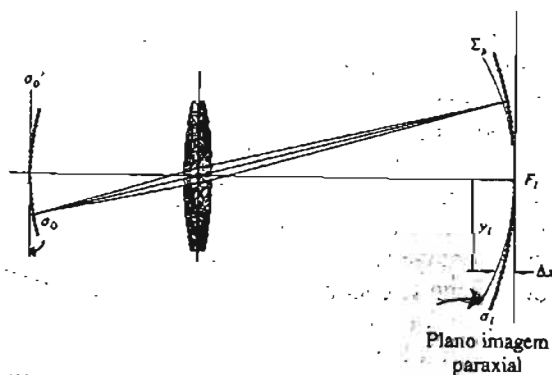
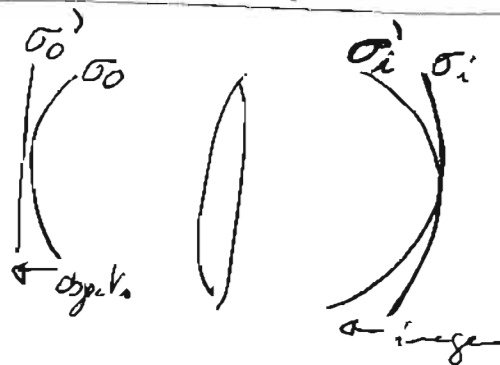


Figura 6.25 Curvatura de campo.



Quando a abertura de um sistema óptico é finita, a imagem forma-se sobre uma superfície curva.

A imagem de um objeto sobre uma calota esférica σ_o forma-se sobre uma calota esférica σ_i . Quando σ_o se "planifica" em σ_o' as imagens curvam-se ainda mais σ_i' .

Esta curvatura pode ser anulada combinando adequadamente lentes positivas e negativas.

(Nota-se que se tivermos um filme (plano) para "recolher" a imagem ele vai receber na imagem formada no centro, mas deformada fora do eixo).

-Distorções

Deve-se ao facto de ampliação transversal variar com a distância ao eixo óptico.

6.29

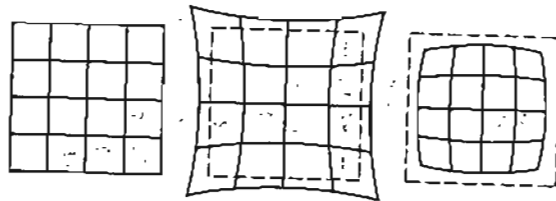


Figura 6.29 Distorção.

A Distorção positiva (ou em alfinete) b) e a Distorção negativa (ou em barril) c).

Um diafragma pode ser usado para controlar este efeito, embora o seu posicionamento seja "crucial":
Apenas se o centro óptico de uma lente delgada coincidir com o centro do diafragma de abertura é que a distorção é nula! ~~o~~ Caso contrário, o diafragma só aumenta a distorção.

A posição do objeto e da imagem resulta na inversão da distorção.

- Aberrações Cromáticas

Até agora, ao falarmos de aberrações, estivemos apenas a considerar aberrações monocromáticas, ou seja sempre para uma dada frequência (cor).

Naturalmente se a frequência for diferente as aberrações também serão diferentes.

Existem no entanto algumas aberrações que só são presentes quando temos várias frequências em simultâneo no sistema: As aberrações Policromáticas.

Qual é a origem destas aberrações? Vejamos a expressão para a distância focal de uma lente:

$$\frac{1}{f} = \left[\frac{n_e}{n_m} - 1 \right] \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right)$$

Orá, já sabemos que n depende de λ , logo $f(\lambda)$ cada comprimento terá uma distância focal diferente!

A aberração cromática axial

ou longitudinal corresponde à distância axial entre os dois pts focais extremos.

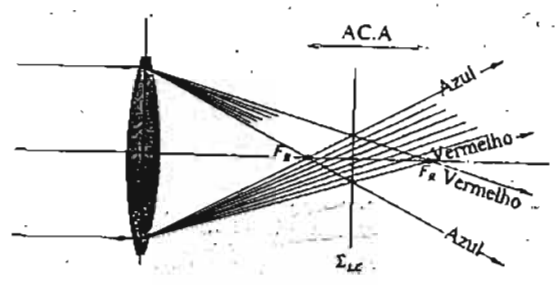
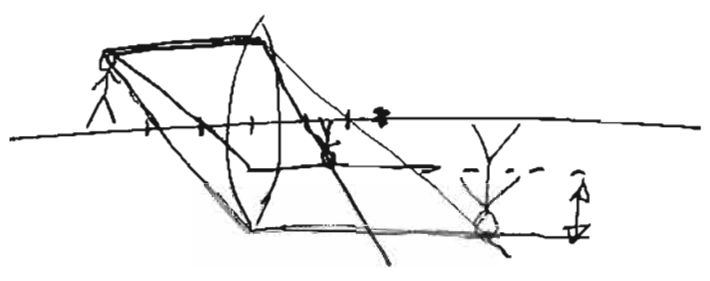


Figura 6.32 Aberração cromática axial.

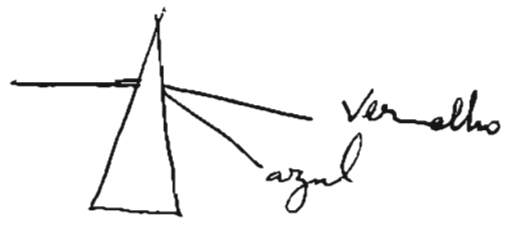
O círculo de confusão mínima situa-se no plano em que se forma a melhor imagem (com menor "confusão" entre as cores).

Naturalmente, se $f(\lambda)$ então

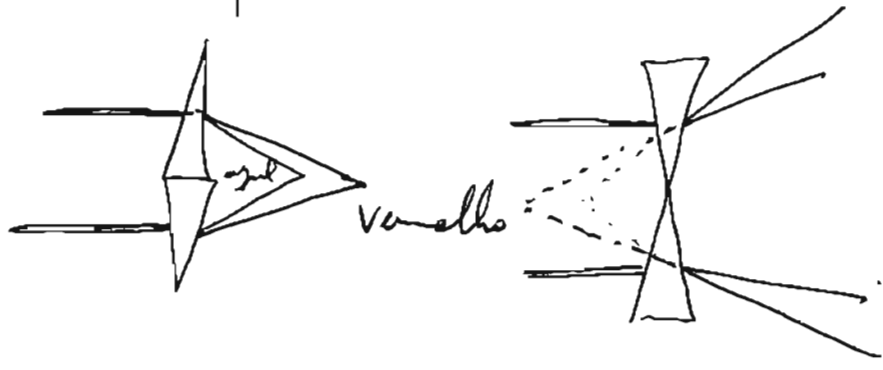
$M_f(\lambda)$, e para um mesmo objecto vemos imagens com tamanhos diferentes, para cores diferentes.



Essa é a aberração cromática lateral.

lembrar-se que 

então pode olhar para a lente



Da figura anterior surge uma ideia: Com duas lentes, uma positiva e outra negativa, é possível corrigir a ~~ab~~ aberração cromática (pelo menos para 2 comprimentos de onda).

Essa combinação designa-se de Acrômica

Se tivermos:

$$\frac{1}{f_1} = (n_1 - 1) \left[\frac{1}{R_{11}} - \frac{1}{R_{12}} \right] \quad \frac{1}{f_2} = (n_2 - 1) \left[\frac{1}{R_{21}} - \frac{1}{R_{22}} \right]$$

ou simplificando:

$$\frac{1}{f_1} = (n_1 - 1) p_1 \quad \frac{1}{f_2} = (n_2 - 1) p_2$$

e lembrando:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} - \frac{d}{f_1 f_2}$$

$$\frac{1}{f} = (n_1 - 1) p_1 + (n_2 - 1) p_2 - d (n_1 - 1) p_1 (n_2 - 1) p_2$$

Se agora aplicarmos esta expressão para dois comprimentos ~~de~~ de onda, digamos o Azul (B) e o vermelho (R).

e fazendo $f_B = f_R$

$$(n_{1R} - 1)l_1 + (n_{2R} - 1)l_2 - d(n_{1R} - 1)(n_{2R} - 1)l_2 =$$

$$= (n_{1B} - 1)l_1 + (n_{2B} - 1)l_2 - d(n_{1B} - 1)(n_{2B} - 1)l_2$$

Se as duas lentes estiverem coladas, $d=0$

$$\frac{l_1}{l_2} = \frac{n_{2B} - n_{2R}}{n_{1B} - n_{1R}}$$

Se escrevermos as distâncias focais das lentes à nota da distância focal para outro comprimento de onda, digamos o Amarelo

$$\frac{1}{f_{1Y}} = (n_{1Y} - 1)l_1 \quad \frac{1}{f_{2Y}} = (n_{2Y} - 1)l_2$$

Logo tb podemos escrever

$$\frac{l_1}{l_2} = \frac{(n_{2Y} - 1)}{(n_{1Y} - 1)} \frac{f_{2Y}}{f_{1Y}}$$

Agora igualando:

$$\frac{f_{2Y}}{f_{1Y}} = \frac{\frac{n_{2B} - n_{2R}}{n_{2Y} - 1}}{\frac{n_{1B} - n_{1R}}{n_{1Y} - 1}} = \frac{1}{V_2} \frac{1}{V_1}$$

e as definições $\frac{1}{V_1} = \frac{n_{1B} - n_{1R}}{n_{1Y} - 1}$ $\frac{1}{V_2} = \frac{n_{2B} - n_{2R}}{n_{2Y} - 1}$ (15)

em que V é o número de Abbe.

Podemos ainda escrever: $f_{1Y} V_1 + f_{2Y} V_2 = 0$

de onde se conclui que $f_1 \cdot f_2 < 0$ (f_1 e f_2 são sempre positivos)

Ou seja, se um for positivo a outra tem que ser negativa!

Os números de Abbe de diversos tipos de vidro podem ser consultados em tabelas, que os fabricantes usam para escolher os materiais com que vão fabricar os pares acromáticos.

Para desenhar os lentes usa-se essencialmente a equação anterior e a equação de associação de lentes:

$$\left\{ \begin{array}{l} f_1 V_1 + f_2 V_2 = 0 \\ \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} = \frac{1}{f} \end{array} \right.$$

Note que esta expressão apenas corrige a distância focal para dois comprimentos de onda, não corrige para todos!

Falta Finalmente, de referir que também é possível corrigir a aberração cromática utilizando um par de lentes do mesmo vidro, como por exemplo no ocular de Huygens. (16)

Não iremos aqui entrar em mais detalhes, que sendo importantes para a fabricação de lentes, são dispensáveis para quem estuda o assunto a este nível.