

# Aberrações e aberrometria

## Óptica Geométrica

S. Mogo

Departamento de Física  
Universidade da Beira Interior

2020 / 21

# Outline

- 1 Definição
- 2 Aberrações cromáticas
- 3 Aberrações monocromáticas
- 4 Frente de onda

# Outline

- 1 Definição
- 2 Aberrações cromáticas
- 3 Aberrações monocromáticas
- 4 Frente de onda

## Aberrações do sistema óptico

Todos os sistemas ópticos possuem aberrações que degradam a qualidade da imagem por eles produzida.



### **Temos vindo a assumir que:**

- as lentes formam imagens pontuais a partir de objectos pontuais (a difracção impede-o);
- se considerarmos um objecto formado por muitos pontos, a imagem desse objecto é uma cópia fiel dele;
- a posição da imagem pode ser obtida através de diagramas de raios (que resultam das leis da refacção e da reflexão).

### **No entanto, estas assumpções só são válidas se considerarmos que:**

- a luz é monocromática;
- a incidência de luz se faz na região paraxial da lente.

# Aberrações do sistema óptico

Acontece que:

- muitos sistemas ópticos são concebidos para luz branca: muitos c.d.o.  $\Rightarrow$  dispersão da luz  $\Rightarrow$  raios luminosos são mais ou menos desviados, dependendo do seu c.d.o.;
- nem todos os raios incidem na região paraxial  $\Rightarrow$   $\alpha \neq \sin \alpha \neq \tan \alpha$  (teoria paraxial ou teoria de 1ª ordem — óptica gaussiana);
- fora da região paraxial, uma melhor estimativa de  $\sin \alpha$  é obtida por:  $\sin \alpha = \alpha - \frac{\alpha^3}{3!} + \frac{\alpha^5}{5!} - \frac{\alpha^7}{7!} + \dots$



Quando se utiliza a aproximação até à terceira ordem ( $\alpha - \frac{\alpha^3}{3!}$ ) — teoria de 3ª ordem — a imagem obtida difere daquela prevista pela teoria paraxial em 5 aspectos que são referidos como **aberrações de Seidel** ou **aberrações primárias**: aberração esférica, coma, astigmatismo, curvatura de campo e distorção.

# Aberrações do sistema óptico

Surgem então várias distorções da imagem que diminuem a sua qualidade.



**Aberrações cromáticas** → são devidas aos meios e desaparecem se a luz for monocromática.

- Aberração cromática axial ou longitudinal
- Aberração cromática lateral ou transversal

**Aberrações monocromáticas** → são devidas à forma das superfícies.

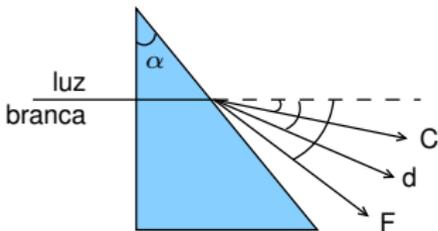
- Aberração esférica
- Coma
- Astigmatismo
- Curvatura de campo
- Distorção

# Outline

- 1 Definição
- 2 Aberrações cromáticas**
- 3 Aberrações monocromáticas
- 4 Frente de onda

# Aberração cromática

Número de Abbe



$$\delta_F = (n_F - 1)\alpha$$

$$\delta_d = (n_d - 1)\alpha$$

$$\delta_C = (n_C - 1)\alpha$$

Poder dispersivo do prisma:

$$\frac{\Delta\delta}{\delta} = \frac{\delta_F - \delta_C}{\delta_d} = \frac{n_F - n_C}{n_d - 1}$$

$$\mathcal{V} = \frac{n_d - 1}{n_F - n_C}$$

**Maior número de Abbe, significa menor poder dispersivo.**

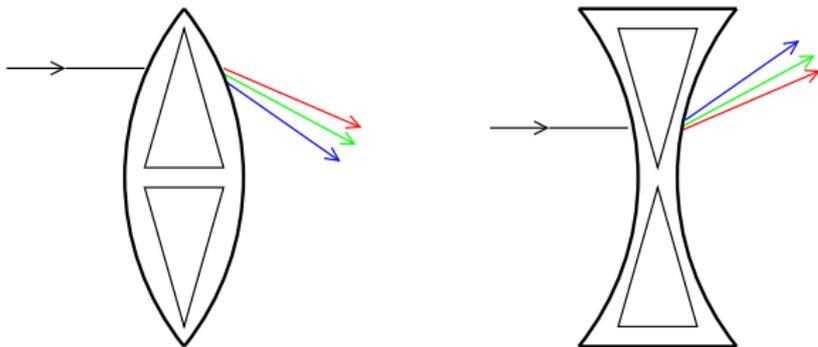
# Aberração cromática

Definição

A. cromáticas

A. monocromáticas

Frente de onda



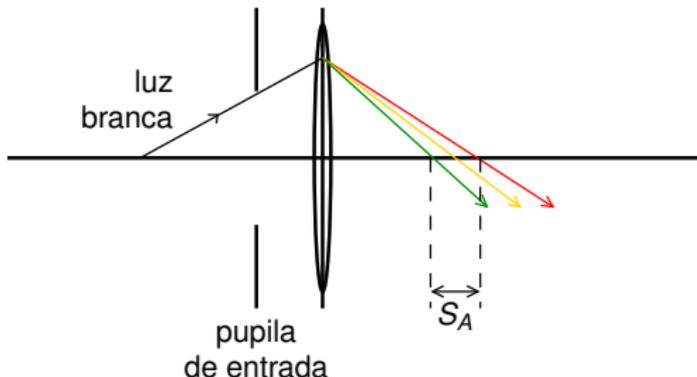
Os fabricantes de lentes costumam especificar a aberração cromática dos seus produtos através do **número de Abbe**, sendo que, a maior número de Abbe corresponde menor **aberração cromática**.

# Aberração cromática

Axial ou longitudinal

**Aberração cromática axial** → diferença no poder dióptrico para os c.d.o. correspondentes às linhas F e C.

$$S_A = F_F - F_C \quad [D]$$



Pode ser expressa em termos de distância no eixo óptico:

$$S_A = f_F - f_C \quad [m]$$

(distância sobre o eixo)

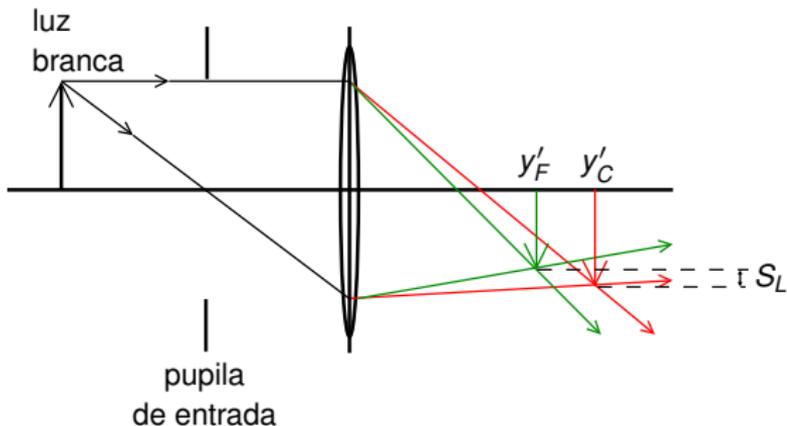
# Aberração cromática

Transversal ou lateral

**Aberração cromática transversal** → diferença no poder prismático para os c.d.o. correspondentes às linhas F e C.

$$S_L = P_F - P_C \quad [\Delta]$$

(distância sobre o plano imagem)



# Aberração cromática

Efeito

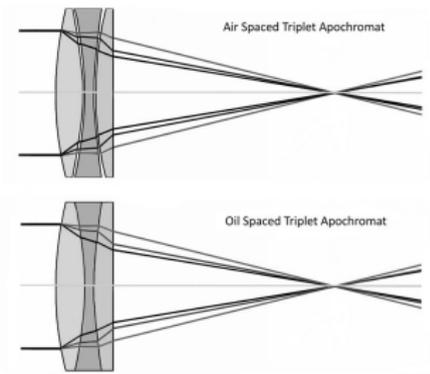
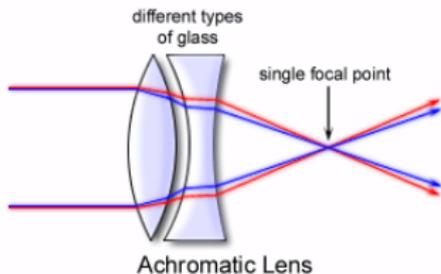


[http://www.physics.purdue.edu/~jones105/phys42200\\_Spring2013/notas/Phys42200\\_Lecture33.pdf](http://www.physics.purdue.edu/~jones105/phys42200_Spring2013/notas/Phys42200_Lecture33.pdf)

# Aberração cromática

## Correcção da aberração cromática

**Correcção da aberração cromática em lentes:**  
podem ser utilizados pares acromáticos, doubletes ou mesmo tripletes.



<https://stephensobservatory.org/achromatic-lens/>

<http://www.ianmorison.com/everything-about-refractors-part-1-their-objective-lenses/>

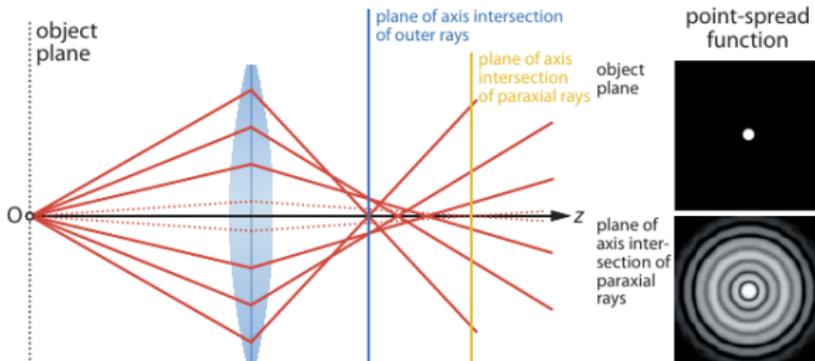
# Outline

- 1 Definição
- 2 Aberrações cromáticas
- 3 Aberrações monocromáticas**
- 4 Frente de onda

# Aberrações monocromáticas

## Aberração esférica

**Aberração esférica** → resulta do facto de os raios não paraxiais focarem mais cedo que os raios paraxiais.



# Aberrações monocromáticas

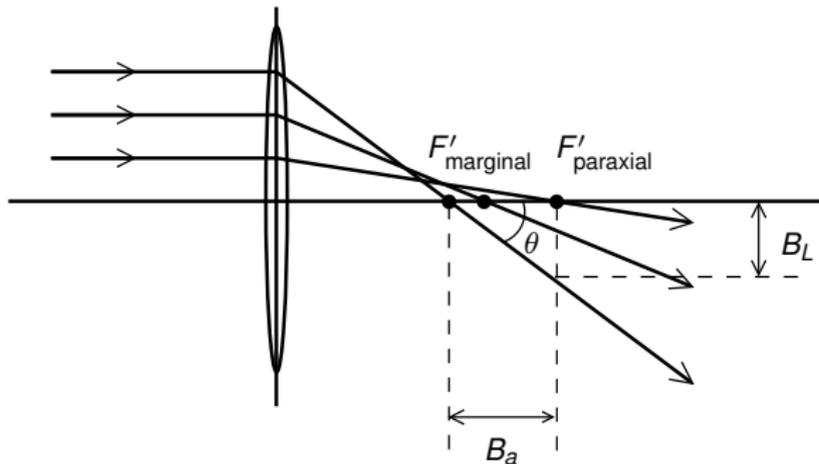
## Aberração esférica axial e lateral

Definição

A. cromáticas

A. monocromáticas

Frente de onda



Aberração esférica axial

$$B_A = f'_{\text{marginal}} - f'_{\text{paraxial}}$$

(distância sobre o eixo)

Aberração esférica lateral

$$B_L = B_A \tan \theta$$

(distância sobre o plano imagem)

# Aberrações monocromáticas

## Correcção da aberração esférica

A correcção da aberração esférica em lentes pode ser conseguida:

- diminuindo o **diâmetro da pupila de entrada**  
(inconveniente de perdermos energia)
- usando **superfícies asféricas**  
(inconveniente de maior dificuldade de fabrico  $\Rightarrow$  maior preço)
- usando **lentes GRIN** (*Gradient index*)  
(inconveniente de maior dificuldade de fabrico  $\Rightarrow$  maior preço)
- alterando o **factor de forma de Coddington**:  $\sigma = \frac{r_2 + r_1}{r_2 - r_1}$   
 $r_1, r_2$  — raios de curvatura das 2 superfícies da lente  
(joga com a curvatura das superfícies na fórmula dos fabricantes de lentes)
- usando várias lentes — **lente composta**.

# Aberrações monocromáticas

## Coma

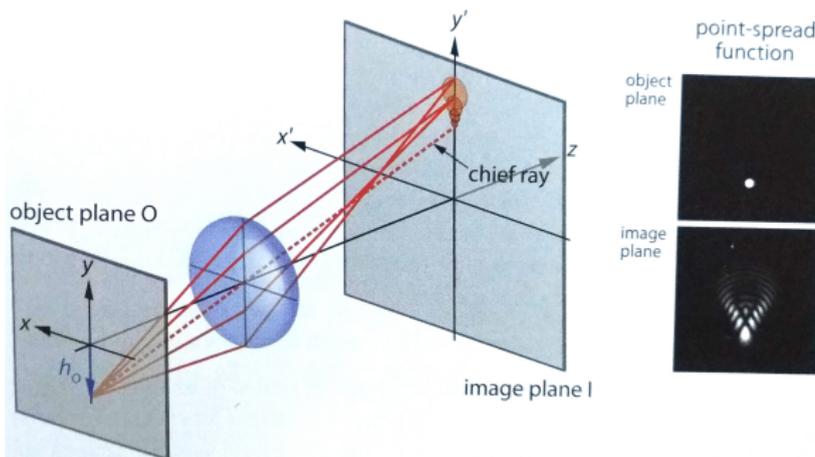
Definição

A. cromáticas

A. monocromáticas

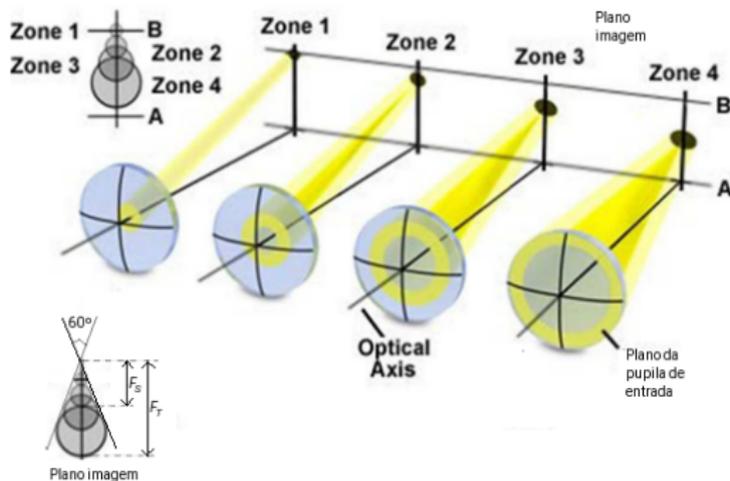
Frente de onda

**Coma** → aberração devida ao facto de os planos objecto e imagem só serem realmente planos na zona paraxial.



# Aberrações monocromáticas

## Círculo comático



[http://www.physics.purdue.edu/~jonea105/phys42200\\_Spring2013/notas/Phys42200\\_Lecture33.pdf](http://www.physics.purdue.edu/~jonea105/phys42200_Spring2013/notas/Phys42200_Lecture33.pdf)

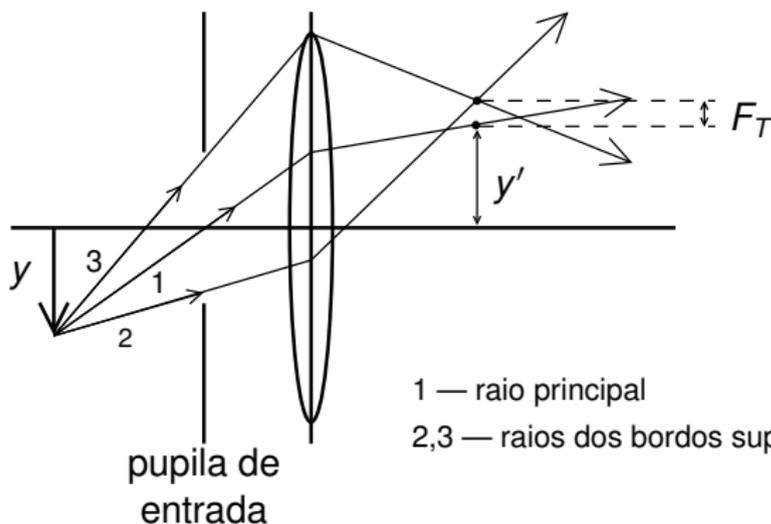
Se um raio  $s$  descrever uma circunferência na pupila de entrada, o seu raio conjugado,  $s'$ , também descreve uma circunferência no espaço da imagem — **círculo comático**.

No entanto, os feixes das circunferências com centro na pupila de entrada não coincidem com as circunferências concêntricas no plano da imagem:

- o aspecto da figura formada sugeriu o nome coma devido ao parecido com um cometa.

# Aberrações monocromáticas

## Coma tangencial e sagital



### Coma tangencial

$$F_T = y' - \frac{y'_{BS} + y'_{BI}}{2}$$

(distância sobre o plano imagem paraxial entre o raio principal e o ponto médio dos raios de bordo superior e inferior)

### Coma sagital

$$F_S = \frac{F_T}{3}$$

# Aberrações monocromáticas

## Correcção da coma — Sistemas aplanáticos

A aberração coma tem o mesmo tipo de soluções que a aberração esférica.

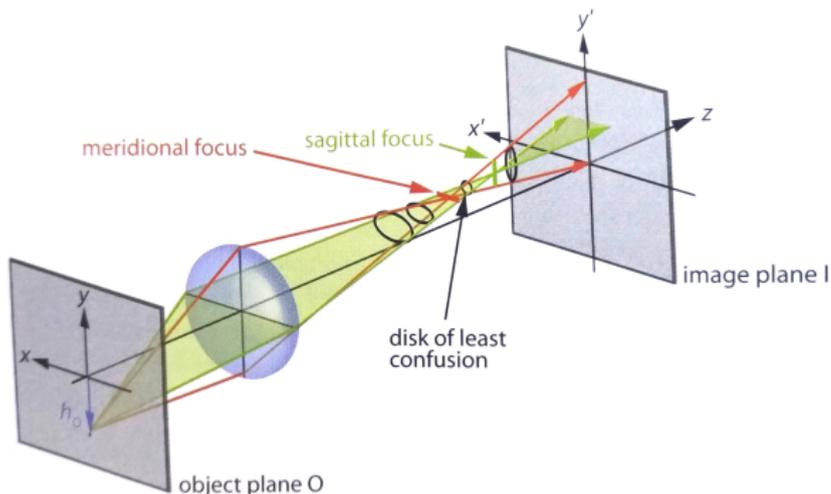


Um sistema óptico corrigido de aberração esférica e coma, denomina-se **aplanático**.

# Aberrações monocromáticas

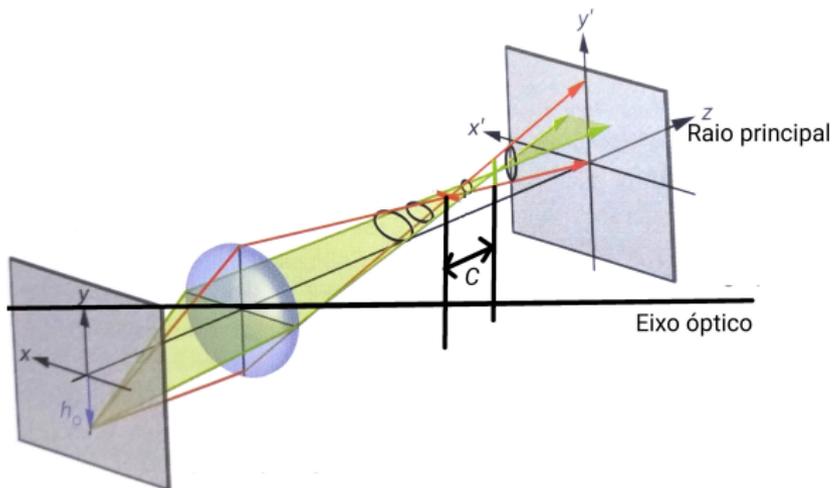
## Astigmatismo oblíquo

**Astigmatismo oblíquo** → quando o objecto pontual está situado fora do eixo óptico, o cone de raios incide na lente de modo assimétrico, originando astigmatismo.



# Aberrações monocromáticas

## Astigmatismo oblíquo



## Astigmatismo oblíquo

$$C = f'_S - f'_T$$

(distância no raio principal, entre as focais sagital e tangencial)

# Aberrações monocromáticas

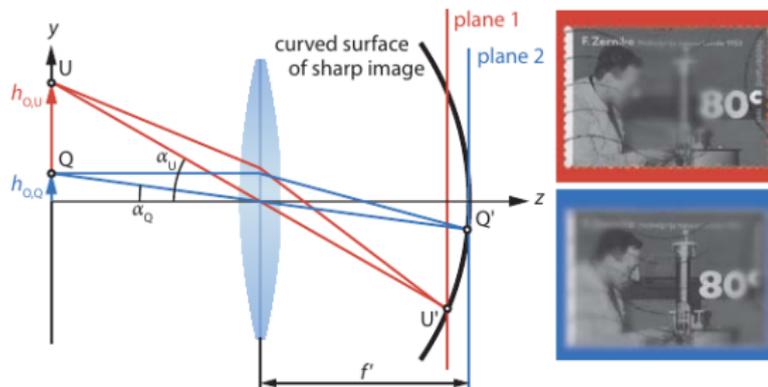
## Correcção do astigmatismo

Um sistema óptico corrigido de astigmatismo denomina-se **anastigmático**.

# Aberrações monocromáticas

## Curvatura de campo

**Curvatura de campo** → é devida a que a imagem de um objecto plano só é plana na zona paraxial, na realidade, forma-se sobre uma superfície curva — **superfície de Petzval**.



Kaszike, M., Donnerhacke, K.-H., Stefan Rill, M. Optical Devices in Ophthalmology and Optometry: Technology, Design Principles, and Clinical Applications. Wiley-VCH, 2014.

**Superfície de Petzval** → é um paraboloide mas costuma ser substituída pela sua osculatriz de raio  $r_P$ .

# Aberrações monocromáticas

## Curvatura de campo e astigmatismo

Quando existe astigmatismo, existem duas superfícies parabólicas: tangencial e sagital:

- nestes casos, observa-se o **teorema de Petzval**:

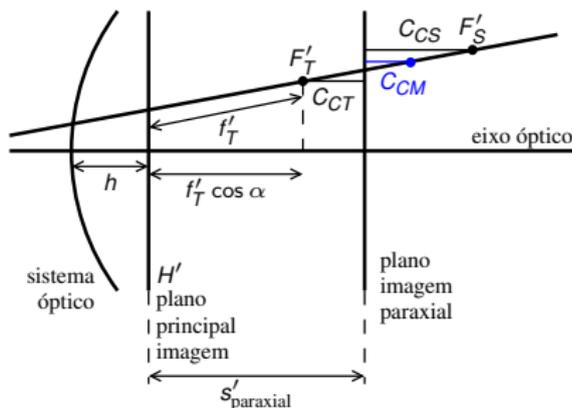
$$\frac{3}{r_S} - \frac{1}{r_T} = \frac{2}{r_P}$$



Quando o astigmatismo está corrigido  $r_S = r_T \equiv r_P$ , sendo  $r_P$  responsável pela curvatura de campo neste caso.

# Aberrações monocromáticas

## Curvatura de campo tangencial e sagital



### Curvatura tangencial

$$C_{CT} = f'_T \cos \theta' + h - s'_{\text{paraxial}}$$

(distância sobre o eixo óptico, entre o vértice da última superfície e a projecção da focal tangencial)

### Curvatura sagital

$$C_{CS} = f'_S \cos \theta' + h - s'_{\text{paraxial}}$$

(distância sobre o eixo óptico, entre o vértice da última superfície e a projecção da focal sagital)

### Curvatura de campo

$$C_{CM} = \frac{3C_{CS} - C_{CT}}{2}$$

(distância sobre o eixo óptico, entre o vértice da última superfície e a projecção do ponto de menor confusão)

# Aberrações monocromáticas

## Curvatura de campo

### **Correcção da curvatura de campo:**

- a curvatura de campo é negativa para uma lente positiva e positiva para uma lente negativa;
- a correcção é realizada utilizando lentes de sinal contrário.

# Aberrações monocromáticas

## Distorção

**Distorção** → resulta do facto de a ampliação,  $m$ , poder ser função da distância da imagem ao eixo, *i.e.*, a ampliação é diferente na zona central e na zona periférica de uma lente esférica.



É a única aberração que não está relacionada com a **desfocagem** da imagem.  
Ela lida com a **ampliação** de objectos extensos.



objectos extensos ↔ objectos pontuais

# Aberrações monocromáticas

## Distorção

A **distorção em barril** resulta da redução da imagem devida a uma **lente negativa** ser maior na periferia do que no centro da lente.



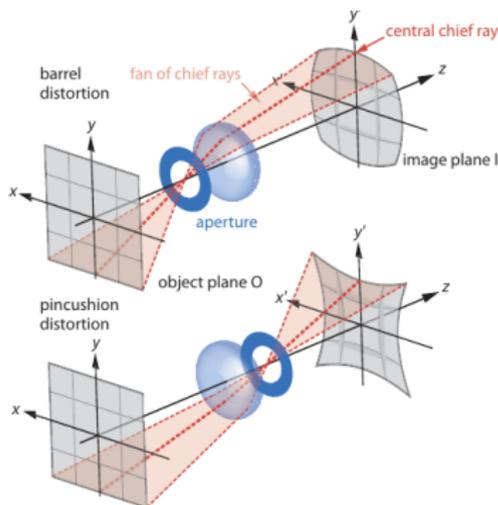
<https://www.techtudo.com.br/artigos/noticia/2012/02/aberracoes-fotograficas-e-como-contorna-las.html>

A **distorção em almofada** resulta da ampliação da imagem devida a uma **lente positiva** ser maior na periferia do que no centro da lente.

# Aberrações monocromáticas

## Distorção

O mesmo efeito pode ser observado se considerarmos a formação da imagem de um objecto extenso, por uma lente. Colocando um diafragma à frente ou atrás da lente, a posição de cada ponto imagem é determinada pelo **raio principal** que passa pelo centro da abertura:



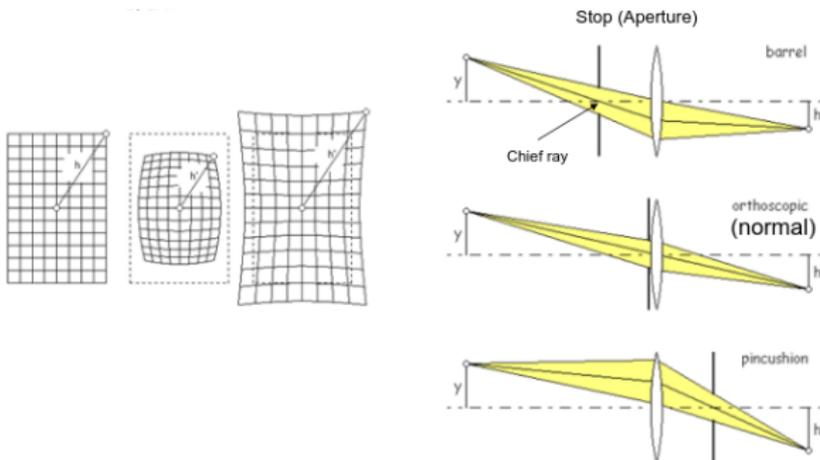
Distorção em barril

Distorção em almofada

# Aberrações monocromáticas

## Distorção

- Se o diafragma estiver em contacto com a lente, o raio principal atravessa-a sem sofrer qualquer desvio e não existe distorção — sistema **ortoscópico**.

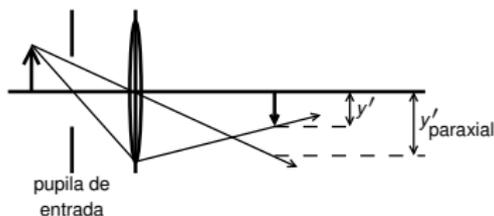


<https://player.slideplayer.com/24/696872/#>

- Se o diafragma se situar entre a lente e o plano objecto, o raio principal passa pela periferia da lente e o tamanho da imagem diminui mais à medida que se afasta do eixo óptico — **distorção em barril**.
- Se o diafragma se situar entre a lente e o plano imagem, o tamanho da imagem aumenta à medida que se afasta do eixo óptico — **distorção em almofada**.

# Aberrações monocromáticas

## Distorção



## Distorção

$$E\% = \frac{y' - y'_{\text{paraxial}}}{y'_{\text{paraxial}}} \times 100\%$$

(distância percentual no plano imagem paraxial, entre o raio principal marginal e o paraxial)

# Aberrações monocromáticas

## Correcção da distorção — sistema ortoscópico

### Correcção da distorção:

- a colocação da pupila de entrada de um lado ou do outro da lente, faz com que a distorção assuma o sinal contrário.



A utilização de diafragmas entre grupos de elementos ópticos pode fazer com que a distorção de uns cancele a distorção dos outros.



Um sistema corrigido de distorção denomina-se **ortoscópico**.

# Outline

- 1 Definição
- 2 Aberrações cromáticas
- 3 Aberrações monocromáticas
- 4 Frente de onda**

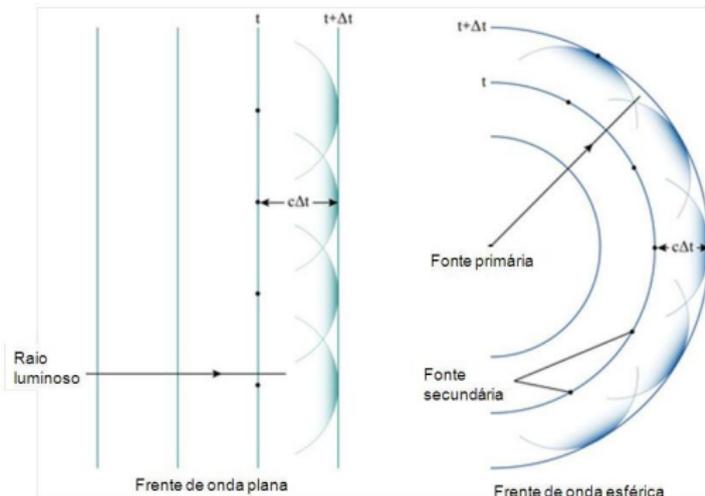
# Ondas e raios de luz

## Princípio de Huygens

Até agora, temos vindo a falar de **aberrações geométricas**:  
incapacidade de os raios se encontrarem no mesmo ponto.



Mas, até já sabemos que cada ponto do plano objecto se comporta  
como uma fonte de ondas esféricas — **princípio de Huygens**.



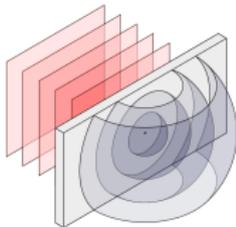
# Ondas e raios de luz

## Frentes de onda x Raios luminosos

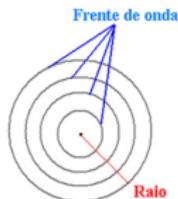
Tratar a luz como um conjunto de raios perpendiculares à direcção de propagação da **frente de onda**, pode ser conveniente mas nem sempre é eficaz.



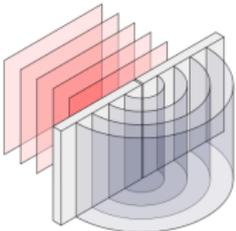
<https://www.mainstreetlaunch.org/the-racial-wealth-gap/>



[http://www.wikiwand.com/en/Aberrations\\_of\\_the\\_eye](http://www.wikiwand.com/en/Aberrations_of_the_eye)



<https://scienceworld.scholastic.com/issues/2017-18/051418/making-waves.html#1090L>



<https://physics.stackexchange.com/questions/71873/diffraction-and-waves>

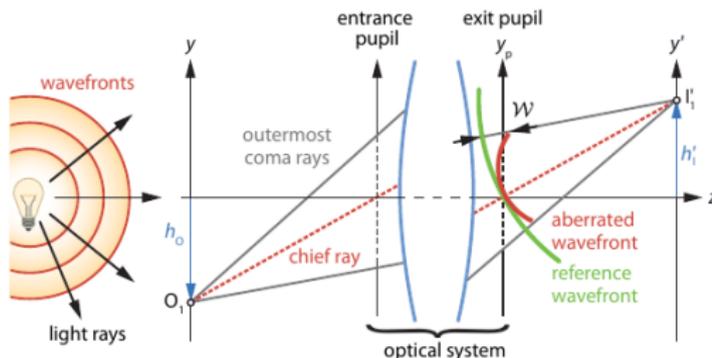


<https://mundoeducacao.bol.uol.com.br/fisica/frente-onda-raio-onda.htm>

# Frente de onda

## Aberrações de frente de onda e aberrações de Seidel

Parte desta frente de onda penetra na pupila de entrada e entra no sistema óptico.



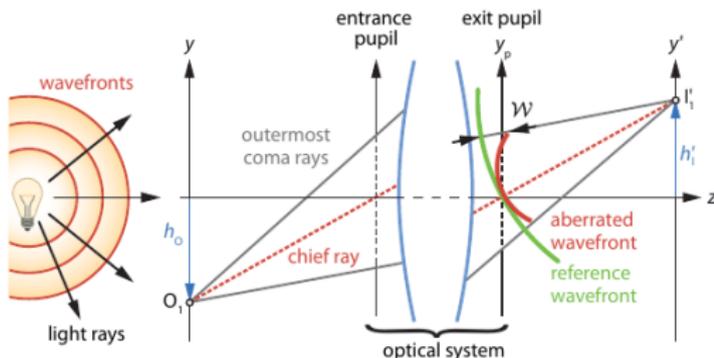
Kaschke, M., Donnerhacke, K.-H., Stefan Riilm. Optical Devices in Ophthalmology and Optometry: Technology, Design Principles, and Clinical Applications. Wiley-VCH, 2014.

- Se o sistema óptico fosse perfeito, conduziria essa frente de onda esférica até à pupila de saída e formaria um ponto conjugado no plano da imagem.

# Frente de onda

## Aberrações de frente de onda e aberrações de Seidel

Parte desta frente de onda penetra na pupila de entrada e entra no sistema óptico.



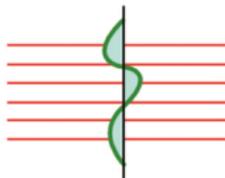
Kaschke, M., Donnerhacke, K.-H., Stefan Riilm. Optical Devices in Ophthalmology and Optometry: Technology, Design Principles, and Clinical Applications. Wiley-VCH, 2014.

- Nos sistemas reais, a onda que passa pela pupila de saída já não é esférica  $\Rightarrow$  em vez de um ponto conjugado, temos uma mancha.

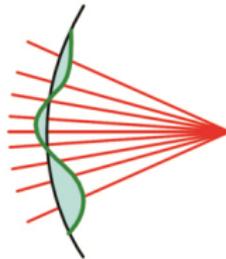
# Frente de onda

## Aberrações de frente de onda e aberrações de Seidel

Frente de onda  
de referência plana



Frente de onda  
de referência esférica



 Aberração da onda  
 Frente de onda com aberrações

[www.draandrea.com.br](http://www.draandrea.com.br)

Aberração da Onda: diferença entre a frente de onda aberrada e a frente de onda de referência

# Frente de onda

## Aberrações de frente de onda e aberrações de Seidel

- Quem trabalha em cálculo de sistemas ópticos, usa predominantemente a abordagem das **aberrações de Seidel**;
- quem trabalha em interferometria, utiliza a abordagem da **frente de onda**.

A maneira em que a frente de onda emergente se afasta da de entrada, pode ser quantificada através dos chamados **polinómios de Zernike** – descrição matemática da frente de onda afectada de aberrações.