

Qualidade da  
imagem  
retiniana  
S. Mogo

Img. retiniana

Óptica x retiniana  
Ametrop. corrigidas  
Ametrop. n corrigidas  
Furo estenopeico  
Difracção  
Critério de resolução

Aberrações

A. cromáticas  
A. monocromáticas  
Aberrometria

Avaliação qldd.

Diagramas de pontos  
Funções transfer.

Model. finitos

Navarro  
Liou-Brennan

# Qualidade da imagem retiniana

## Óptica Visual

S. Mogo

Departamento de Física  
Universidade da Beira Interior

2021 / 22

# Outline

## 1 Imagem retiniana

- Imagen óptica e imagem retiniana
- Imagen retiniana em ametropias corrigidas
- Imagen retiniana em ametropias não corrigidas
- Furo estenopeico
- Difracção
- Critérios de resolução

## 2 Aberrações do olho

- Aberrações cromáticas
- Aberrações monocromáticas
- Aberrometria

## 3 Métricas de qualidade da imagem

- Diagramas de pontos
- Funções de transferência

## 4 Modelos esquemáticos do olho finitos

- Modelo do olho de Navarro
- Modelo do olho de Liou-Brennan

Img. retiniana

Óptica x retiniana  
Ametrop. corrigidas  
Ametrop. n corrigidas  
Furo estenopeico  
Difracção  
Critério de resolução

Aberrações

A. cromáticas  
A. monocromáticas  
Aberrometria

Avaliação qld.

Diagramas de pontos  
Funções transfer.

Model. finitos

Navarro  
Liou-Brennan

# Outline

1

## Imagen retiniana

Imagen óptica e imagen retiniana  
Imagen retiniana em ametropias corrigidas  
Imagen retiniana em ametropias não corrigidas  
Furo estenopeico  
Difracção  
Critérios de resolução

2

## Aberrações do olho

Aberrações cromáticas  
Aberrações monocromáticas  
Aberrometria

3

## Métricas de qualidade da imagem

Diagramas de pontos  
Funções de transferência

4

## Modelos esquemáticos do olho finitos

Modelo do olho de Navarro  
Modelo do olho de Liou-Brennan

# Imagen óptica e imagen retiniana

Img. retiniana

Óptica x retiniana

Ametrop. corrigidas

Ametrop. n corrigidas

Furo estenopeico

Difracção

Critério de resolução

Aberrações

A. cromáticas

A. monocromáticas

Aberrometria

Avaliaçao qldd.

Diagramas de pontos

Funções transfer.

Model. finitos

Navarro

Liou-Brennan

**Imagen óptica** → é a imagem **nítida** formada pelo sistema refractor do olho sem a retina estar presente.



**Imagen retiniana** → é a imagem que o sistema refractor do olho forma sobre a retina (pode ser focada ou desfocada).



A formação de imagen óptica não será possível se ela se situar para trás da retina (hipermetropia).

# Imagen óptica e imagem retiniana

Img. retiniana

Óptica x retiniana

Ametrop. corrigidas

Ametrop. n corrigidas

Furo estenopeico

Difracção

Critério de resolução

Aberrações

A. cromáticas

A. monocromáticas

Aberrometria

Avaliação qldd.

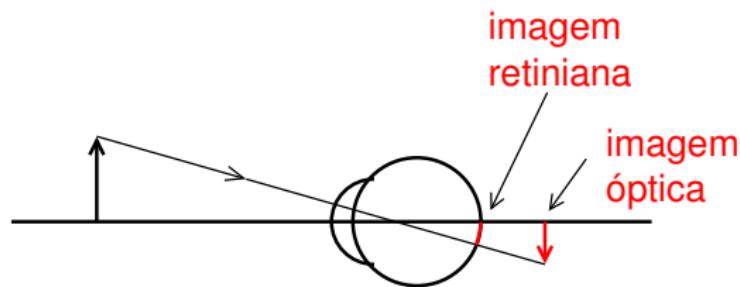
Diagramas de pontos

Funções transfer.

Model. finitos

Navarro

Liou-Brennan



# Imagen óptica e imagen retiniana

Img. retiniana

Óptica x retiniana

Ametrop. corrigidas

Ametrop. n corrigidas

Furo estenopeico

Difracção

Critério de resolução

Aberrações

A. cromáticas

A. monocromáticas

Aberrometria

Avaliaçao qldd.

Diagramas de pontos

Funções transfer.

Model. finitos

Navarro

Liou-Brennan

## Exemplo:

Um objecto com altura 50 mm está situado no eixo óptico de um olho reduzido emétreope a 250 mm do seu ponto principal.

Determine se é possível a formação de imagem óptica e, em caso afirmativo, encontre a sua posição e o seu tamanho.

# Imagen retiniana em ametropias corrigidas

Img. retiniana

Óptica x retiniana

Ametrop. corrigidas

Ametrop. n corrigidas

Furo estenopeico

Difracção

Critério de resolução

Aberrações

A. cromáticas

A. monocromáticas

Aberrometria

Avaliaçao qldd.

Diagramas de pontos

Funções transfer.

Model. finitos

Navarro

Liou-Brennan

A compensação de ametropias com lentes, pode ser vista como um sistema de 2 lentes em que:

- 1 a lente correctora forma uma imagem de um objecto situado no infinito óptico;
- 2 esta imagem torna-se um objecto para o olho;
- 3 o olho forma na retina a imagem desse objecto.

# Imagen retiniana em ametropias corrigidas

Hipermétrope

Img. retiniana

Óptica x retiniana

Ametrop. corrigidas

Ametrop. n corrigidas

Furo estenopeico

Difracção

Critério de resolução

Aberrações

A. cromáticas

A. monocromáticas

Aberrometria

Avaliação qld.

Diagramas de pontos

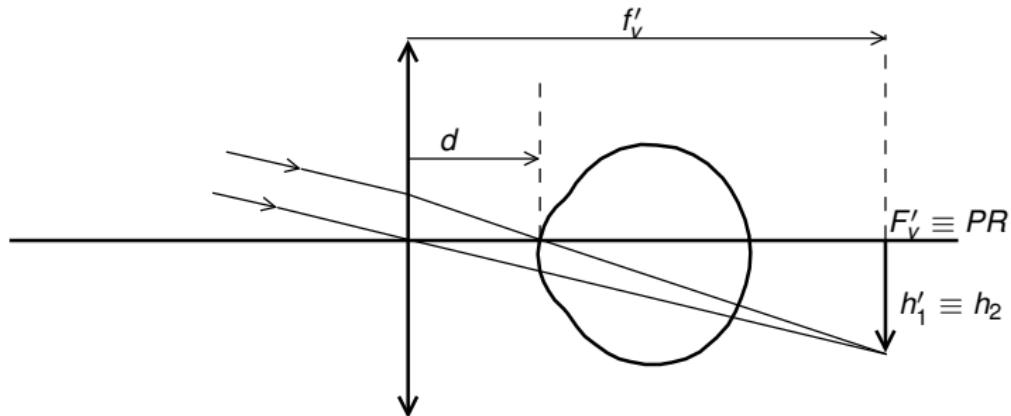
Funções transfer.

Model. finitos

Navarro

Liou-Brennan

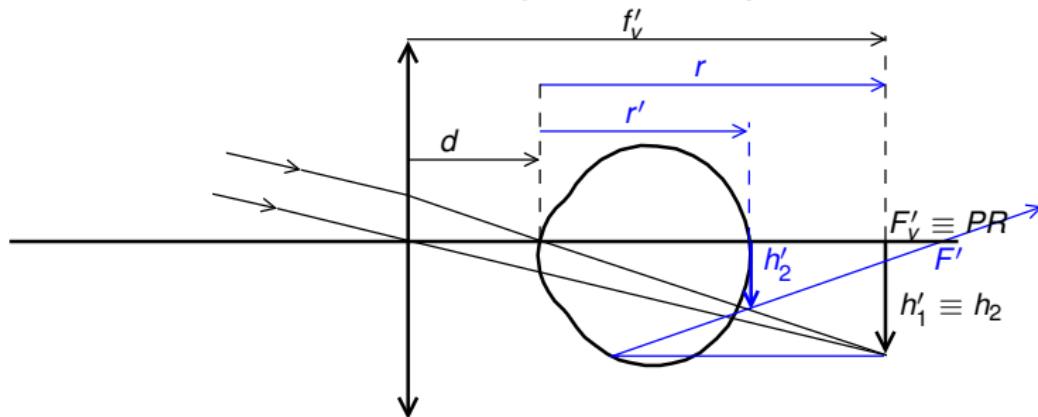
No caso do hipermétrope, a imagem formada pela lente correctora funciona como objecto virtual para o olho:



# Imagen retiniana em ametropias corrigidas

Hipermétrope

No caso do hipermétrope, a imagem formada pela lente correctora funciona como objecto virtual para o olho:



# Imagen retiniana em ametropias corrigidas

Míope

Img. retiniana

Óptica x retiniana

Ametrop. corrigidas

Ametrop. n corrigidas

Furo estenopeico

Difracção

Critério de resolução

Aberrações

A. cromáticas

A. monocromáticas

Aberrometria

Avaliação qldd.

Diagramas de pontos

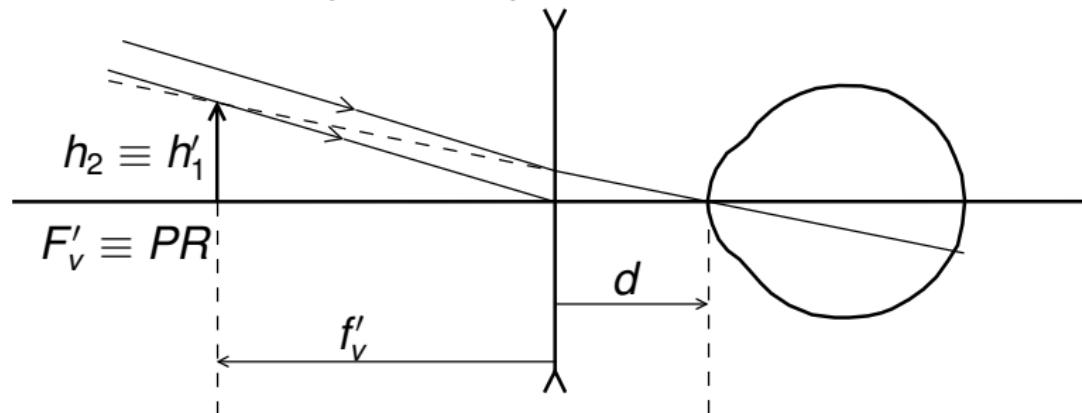
Funções transfer.

Model. finitos

Navarro

Liou-Brennan

No caso do míope, a imagem formada pela lente correctora funciona como objecto real para o olho:



# Imagen retiniana em ametropias corrigidas

Míope

Img. retiniana

Óptica x retiniana

Ametrop. corrigidas

Ametrop. n corrigidas

Furo estenopeico

Difracção

Critério de resolução

Aberrações

A. cromáticas

A. monocromáticas

Aberrometria

Avaliação qldd.

Diagramas de pontos

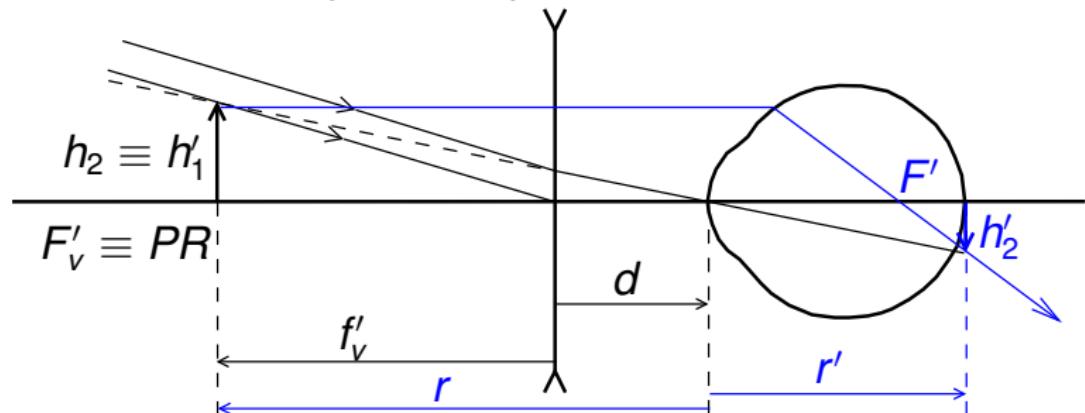
Funções transfer.

Model. finitos

Navarro

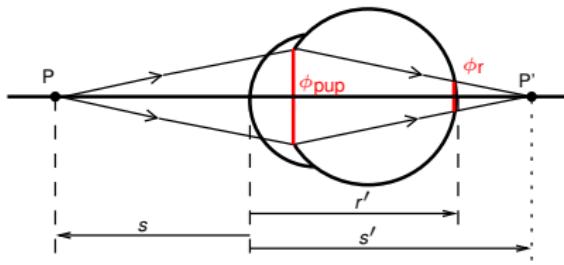
Liou-Brennan

No caso do míope, a imagem formada pela lente correctora funciona como objecto real para o olho:



## Imagen retiniana em ametropias não corrigidas

Agora vamos considerar a imagem desfocada formada na retina de um olho amétrope não corrigido:



- Para a imagem ser nítida,  $r'$  deveria ser igual a  $s'$ ;
- quando não são iguais, a imagem de um ponto formada na retina é um círculo difuso;
- o tamanho desse círculo,  $\phi_r$ , depende de:
  - $\phi_{pup}$  — diâmetro da pupila (limita o feixe procedente do ponto P que pode entrar no olho);
  - $r'$  — comprimento axial do olho;
  - $s'$  — posição onde se formaria a imagem nítida.

# Imagen retiniana em ametropias não corrigidas

Img. retiniana

Óptica x retiniana  
Ametrop. corrigidas

Ametrop. n corrigidas

Furo estenopeico

Difracção

Critério de resolução

Aberrações

A. cromáticas

A. monocromáticas

Aberrometria

Avaliação qldd.

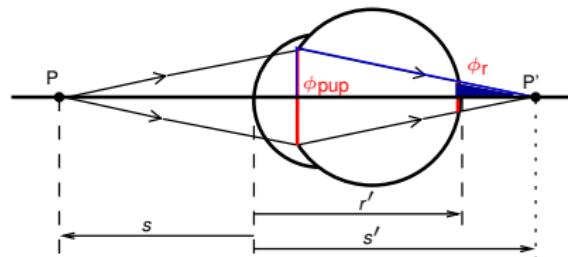
Diagramas de pontos

Funções transfer.

Model. finitos

Navarro

Liou-Brennan



$$\frac{\phi_{\text{pup}}/2}{\phi_r/2} = \frac{s'}{s' - r'} \quad \Rightarrow \quad \phi_r = \phi_{\text{pup}} \left( \frac{s' - r'}{s'} \right)$$

$$V' = \frac{n'}{s'} \quad \wedge \quad R'_{oc} = \frac{n'}{r'}$$

$$\Rightarrow \quad \boxed{\phi_r = \phi_{\text{pup}} \left( \frac{R'_{oc} - V'}{R'_{oc}} \right)}$$

# Imagen retiniana em ametropias não corrigidas

Contribuição da pupila

$$\phi_r = \phi_{pup} \left( \frac{R'_{oc} - V'}{R'_{oc}} \right)$$

Assim, o diâmetro do círculo difuso e o diâmetro da pupila estão directamente relacionados:  $\phi_{pup} < \phi_r$ , mostrando que a pupila possui um papel fundamental na formação da imagem retiniana.



Pode ocorrer que:

- indivíduos com miopia mais elevada e pupila pequena, vejam melhor do que outros com miopia mais baixa (mas pupila maior).

## Furo estenopeico

**Furo estenopeico** → pupila artificial com 1 mm de diâmetro que apenas deixa passar um pequeno feixe de raios luminosos.

$$\phi_r = \phi_{pup} \left( \frac{R'_{oc} - V'}{R'_{oc}} \right)$$

### Utilidade clínica do furo estenopeico:

- o tamanho dos círculos difusos na retina reduz-se de tal maneira que há uma melhoria aparente da visão;
- se esta melhoria não for observada, indica a existência de um problema de origem funcional (uma patologia e não um erro refractivo).

# Furo estenopeico

Img. retiniana

Óptica x retiniana  
Ametrop. corrigidas  
Ametrop. n corrigidas  
**Furo estenopeico**  
Difracção  
Critério de resolução

Aberrações

A. cromáticas  
A. monocromáticas  
Aberrometria

Avaliação qld.  
Diagramas de pontos  
Funções transfer.

Model. finitos

Navarro  
Liou-Brennan

Os optótipos são objectos extensos formados por conjuntos de pontos (círculos difusos).



Schwartz,S.. Geometrical and Visual Optics: A Clinical Introduction. 3rd. Ed., McGrawHill, 2019.

## Limite em que ocorre difracção

Por outro lado, pupila mais pequena significa que entra menos luz dentro do olho e torna-se mais notório o efeito da **difracção**.



Disco de Airy

Devido à natureza da luz, a imagem de um objecto pontual, não é um ponto mas sim um disco — **disco de Airy**.



**O disco de Airy não deve ser confundido com os círculos difusos devidos à desfocagem da imagem.**

# Difracção

Img. retiniana

Óptica x retiniana  
Ametrop. corrigidas  
Ametrop. n corrigidas  
Furo estenopeico  
Difracção  
Critério de resolução

Aberrações

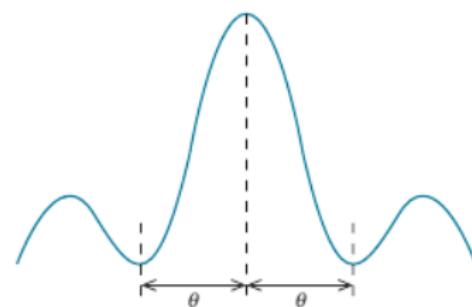
A. cromáticas  
A. monocromáticas  
Aberrometria

Avaliaçao qldd.

Diagramas de pontos  
Funções transfer.

Model. finitos

Navarro  
Liou-Brennan



$$\omega = 2\theta = 2,44 \frac{\lambda}{\phi_{\text{pup}}}$$

onde  $\lambda$  é o c.d.o. da luz e  $\phi_{\text{pup}}$  é o diâmetro da pupila.

## Critérios de resolução

Quando observamos 2 objectos pontuais, colocados lado a lado, formam-se 2 padrões de difracção, cada um com o seu disco de Airy.



Como  $\omega = 2,44 \frac{\lambda}{\phi_{\text{pup}}}$ , vemos que quanto mais pequena for a pupila, maior será o diâmetro do disco de Airy.

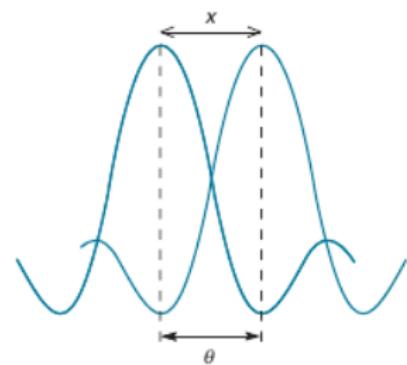
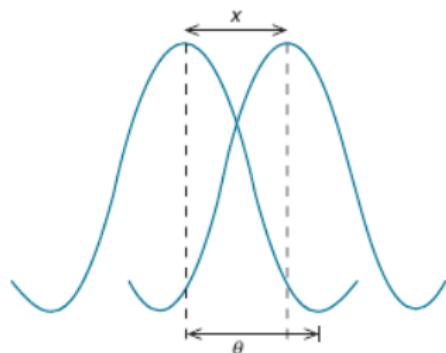


Pode ocorrer sobreposição dos dois padrões!



# Critérios de resolução

## Critério de Rayleigh



Critério de resolução de Rayleigh:

- estabelece que para 2 objectos poderem ser resolvidos, o máximo central do disco de Airy de um dos objectos, deve coincidir com o primeiro mínimo do disco de Airy outro objecto.

# Outline

1

## Imagen retiniana

Imagen óptica e imagen retiniana

Imagen retiniana em ametropias corrigidas

Imagen retiniana em ametropias não corrigidas

Furo estenopeico

Difracção

Critérios de resolução

2

## Aberrações do olho

Aberrações cromáticas

Aberrações monocromáticas

Aberrometria

3

## Métricas de qualidade da imagem

Diagramas de pontos

Funções transfer.

4

## Modelos esquemáticos do olho finitos

Modelo do olho de Navarro

Modelo do olho de Liou-Brennan

# Aberrações do olho

Como todos os sistemas ópticos, o olho possui aberrações que degradam a qualidade da imagem por ele produzida.



## Como já temos vindo a estudar:

- o olho não forma imagens pontuais a partir de objectos pontuais (já vimos que a difracção o impede);
- se considerarmos um objecto extenso, formado por muitos pontos, a imagem desse objecto não é uma cópia fiel dele;
- a posição/tamanho/forma da imagem não podem ser obtidos através de diagramas de raios que resultem apenas das leis da refracção e da reflexão (só é assim na região paraxial).

**Estas 3 assumpções só seriam válidas se considerassemos que:**

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

# Aberrações do olho

Para o caso do olho humano:

- concebido 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 1<sup>a</sup> 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 3<sup>a</sup> 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 olho

Como para qualquer outro sistema óptico, surgem então várias distorções da imagem que diminuem a sua qualidade.

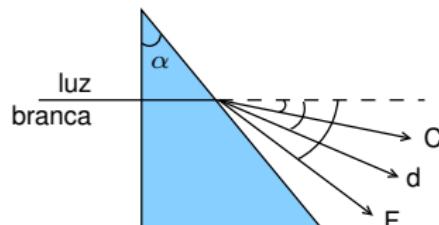


**Aberrações cromáticas** → são devidas aos meios e desaparecem se a luz for monocromática.

- 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



# Aberração cromática

Número de Abbe  
(rever em Óptica Geométrica)

Desvio para os c.d.o. das riscas de Fraunhofer:

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

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

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

Poder dispersivo do prisma:  $\frac{\Delta\delta}{\delta} = \frac{\delta_F - \delta_C}{\delta_d} = \frac{(n_F - 1)\alpha - (n_C - 1)\alpha}{(n_d - 1)\alpha} = \frac{n_F - n_C}{n_d - 1}$

- Notar que o poder dispersivo do prisma não depende de  $\alpha$ ;
- depende apenas do material do prisma;
- o seu inverso denomina-se **número de Abbe** ou **número  $\mathcal{V}$** :

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

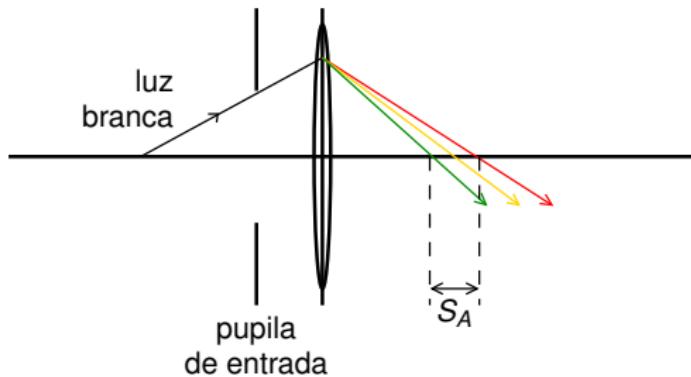
- maior número de Abbe, significa menor poder dispersivo.

# Aberraçāo cromática

Axial ou longitudinal

Aberraçāo 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)

# Aberraçāo cromática

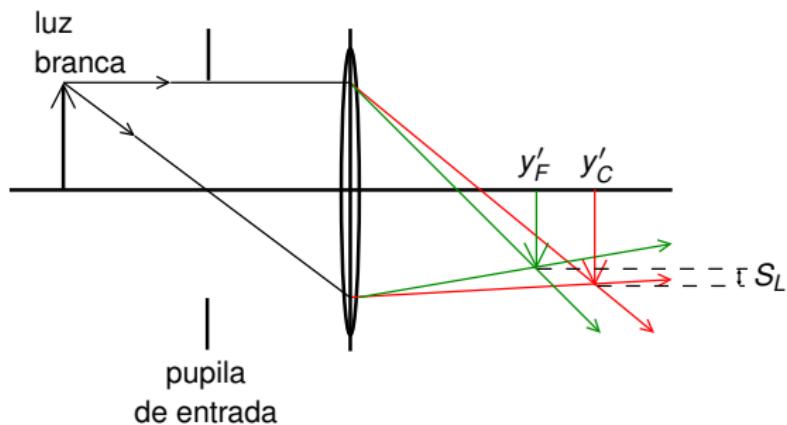
Transversal ou lateral

## Aberrações

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

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

(distância sobre o plano imagem)



# Aberraçāo cromática

## Olho humano

Img. retiniana

Óptica x retiniana  
Ametrop. corrigidas  
Ametrop. n corrigidas  
Furo estenopeico  
Difracção  
Critério de resolução

Aberrações

A. cromáticas  
A. monocromáticas  
Aberrometria

Avaliaçāo qldd.

Diagramas de pontos  
Funções transfer.

Model. finitos

Navarro  
Liou-Brennan

Para radiação electromagnética situada entre 380 nm e 760 nm, **o olho humano apresenta uma aberração cromática de  $\sim 2,50 \text{ D}$ , que corresponde a uma distância linear de  $\sim 0,93 \text{ mm}$ .**



Normalmente não somos conscientes desta aberração mas pensa-se que pode funcionar como pista para o sistema visual saber se deve aumentar ou diminuir a sua potência (acomodar ou relaxar) quando se forma na retina a imagem desfocada de um objecto situado a distância diferente daquela que está a ser observada.



# Aberraçāo cromática

## Teste bicromático

**Teste bicromático** → técnica para determinar a refracção que utiliza como princípio a aberraçāo cromática.

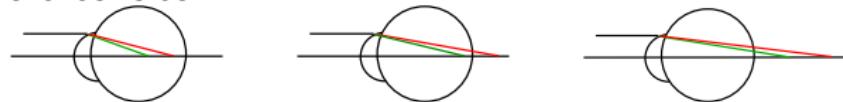


É apresentado ao observador um teste constituído por uma metade verde e uma metade vermelha, ambas incluindo detalhes negros.



Devido à aberraçāo cromática, a radiação verde foca antes da vermelha:

- se o indivíduo for míope, verá + nítidos os detalhes negros sobre o fundo vermelho;
- se o indivíduo for emétreope, verá os detalhes com o mesmo grau de nitidez em ambos lados;
- se o indivíduo for hipermetrope, verá mais nítidos os detalhes negros sobre o fundo verde.



# Aberraçao cromática

## Lentes oftálmicas

Img. retiniana

Óptica x retiniana  
Ametrop. corrigidas  
Ametrop. n corrigidas  
Furo estenopeico  
Difracção  
Critério de resolução

Aberrações

A. cromáticas  
A. monocromáticas  
Aberrometria

Avaliação qldd.

Diagramas de pontos  
Funções transfer.

Model. finitos

Navarro  
Liou-Brennan

Quando se prescrevem lentes com baixo número de Abbe (p.ex., lentes de policarbonato), se a potência for elevada, a aberraçao cromática da lente pode tornar-se aparente e o paciente manifesta ver franjas coloridas.



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



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

# Aberrações monocromáticas

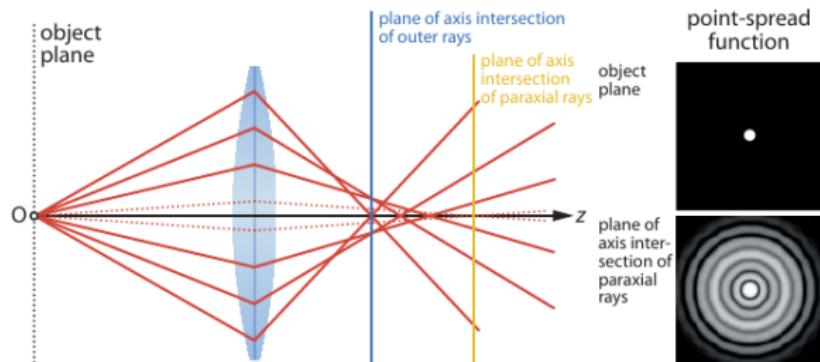
## Aberração esférica

Img. retiniana  
Óptica x retiniana  
Ametrop. corrigidas  
Ametrop. n corrigidas  
Furo estenopeico  
Difracção  
Critério de resolução

Aberrações  
A. cromáticas  
A. monocromáticas  
Aberrometria

Avaliação qldd.  
Diagramas de pontos  
Funções transfer.

Model. finitos  
Navarro  
Liou-Brennan



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

# Aberrações monocromáticas

## Aberração esférica axial e lateral

Img. retiniana

Óptica x retiniana  
Ametrop. corrigidas  
Ametrop. n corrigidas  
Furo estenopeico  
Difracção  
Critério de resolução

Aberrações

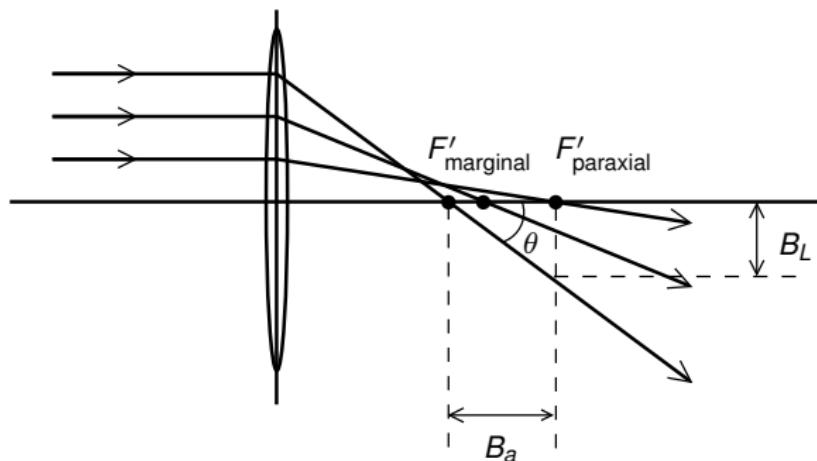
A. cromáticas  
A. monocromáticas  
Aberrometria

Avaliação qld.

Diagramas de pontos  
Funções transfer.

Model. finitos

Navarro  
Liou-Brennan



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

Aberração esférica e miopia nocturna

Img. retiniana

Óptica x retiniana  
Ametrop. corrigidas  
Ametrop. n corrigidas  
Furo estenopeico  
Difracção  
Critério de resolução

Aberrações

A. cromáticas  
A. monocromáticas  
Aberrometria

Avaliação qld.  
Diagramas de pontos  
Funções transfer.

Model. finitos

Navarro  
Liou-Brennan

Em condições de baixa iluminação a pupila do olho humano aumenta de diâmetro deixando passar mais raios marginais.



Esses raios podem ser focados à frente da retina, contribuindo para uma condição denominada **miopia nocturna**.

**Miopia nocturna** → condição em que o olho se torna míope apenas em baixas condições de iluminação.  
(Condução nocturna)

# Aberrações monocromáticas

Correcção da aberração esférica

Img. retiniana

Óptica x retiniana  
Ametrop. corrigidas  
Ametrop. n corrigidas  
Furo estenopeico  
Difracção  
Critério de resolução

Aberrações

A. cromáticas  
A. monocromáticas  
Aberrometria

Avaliação qldd.  
Diagramas de pontos  
Funções transfer.

Model. finitos

Navarro  
Liou-Brennan

A correcção da aberração esférica em lentes pode ser conseguida:

- diminuindo o **diâmetro da pupila de entrada**  
(inconveniente de pertermos 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 **fator 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**.

Qualidade da  
imagem  
retiniana  
S. Mogo

Img. retiniana  
Óptica x retiniana  
Ametrop. corrigidas  
Ametrop. n corrigidas  
Furo estenopeico  
Difracção  
Critério de resolução

Aberrações  
A. cromáticas  
A. monocromáticas  
Aberrometria

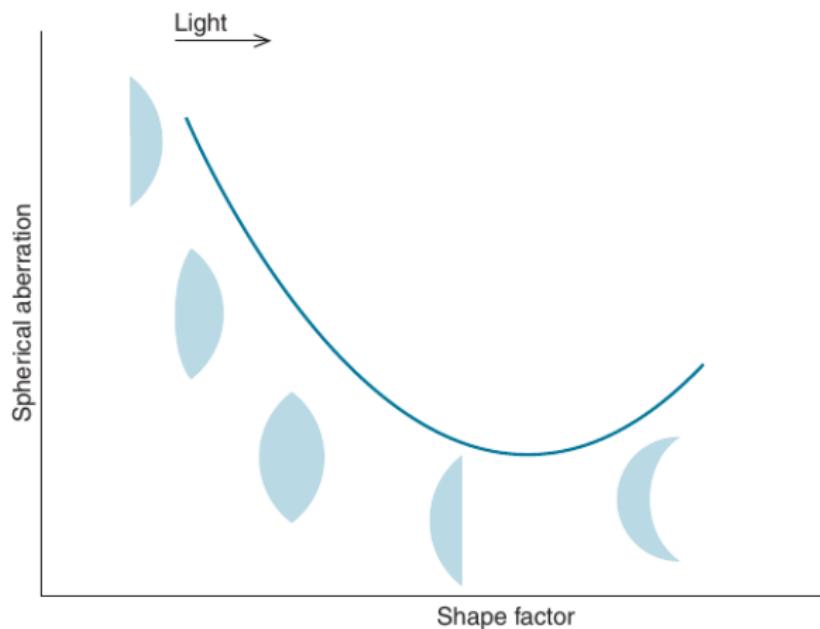
Avaliação qld.  
Diagramas de pontos  
Funções transfer.

Model. finitos  
Navarro  
Liou-Brennan

# Aberrações monocromáticas

Aberração esférica e lentes oftálmicas

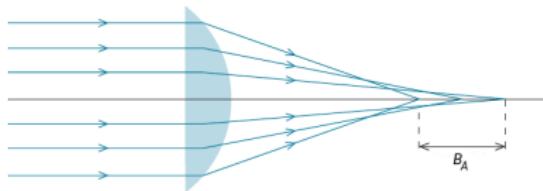
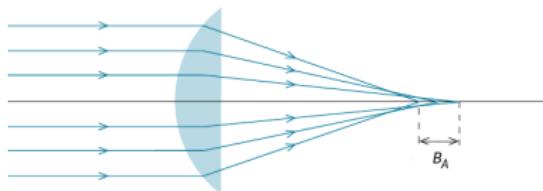
Utilização do factor de forma de Coddington para controlar a aberração esférica:



# Aberrações monocromáticas

## Aberração esférica e lentes oftálmicas

Numa lente plano-convexa, a aberração esférica axial é mínima quando os raios luminosos incidem na superfície convexa:



Colocação da lente oftálmica na armação.

# Aberrações monocromáticas

Coma

Img. retiniana

Óptica x retiniana  
Ametrop. corrigidas  
Ametrop. n corrigidas  
Furo estenopeico  
Difracção  
Critério de resolução

Aberrações

A. cromáticas  
A. monocromáticas  
Aberrometria

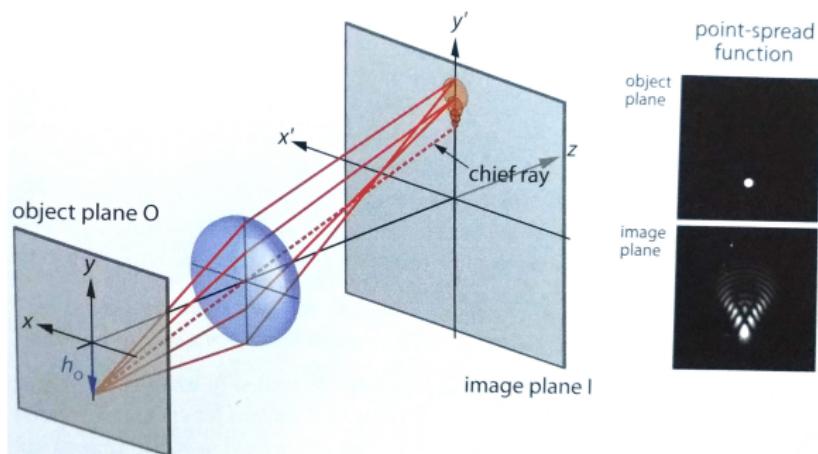
Avaliação qdd.

Diagramas de pontos  
Funções transfer.

Model. finitos

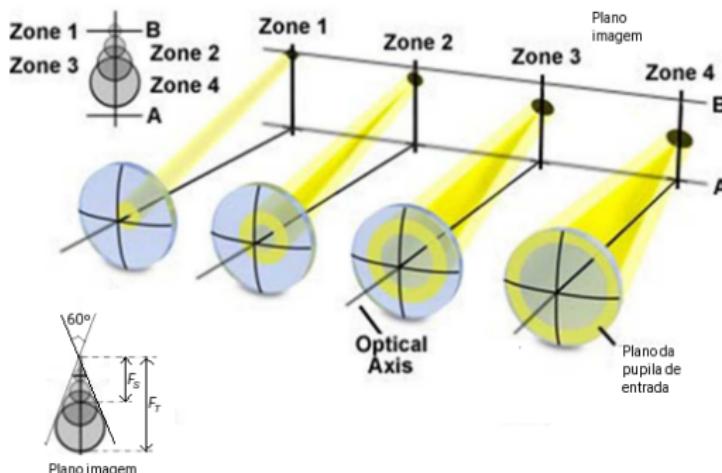
Navarro  
Liou-Brennan

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



# Aberrações monocromáticas

## Círculo comático



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**.

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

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

Img. retiniana

Óptica x retiniana  
Ametrop. corrigidas  
Ametrop. n corrigidas  
Furo estenopeico  
Difracção  
Critério de resolução

Aberrações

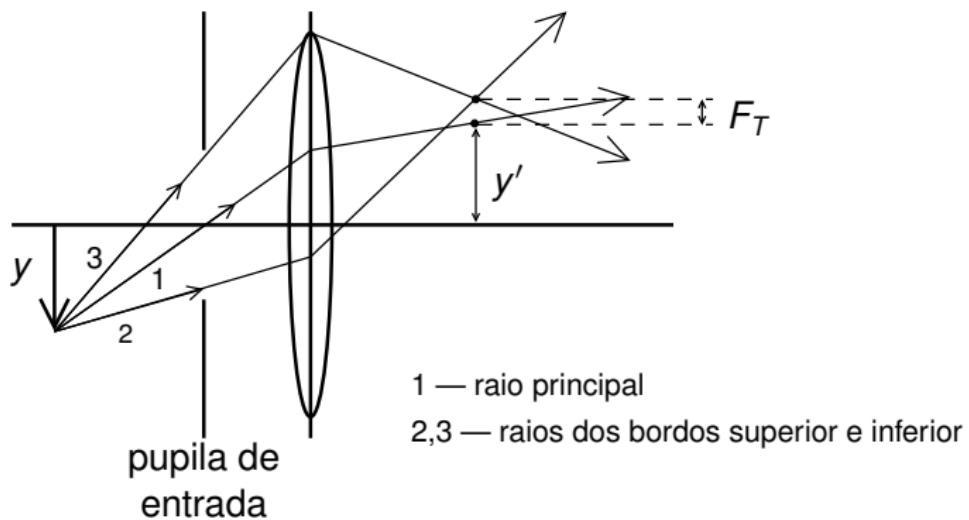
A. cromáticas  
A. monocromáticas  
Aberrometria

Avaliação qdd.

Diagramas de pontos  
Funções transfer.

Model. finitos

Navarro  
Liou-Brennan



1 — raio principal

2,3 — raios dos bordos superior e inferior

## 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

Coma — Olho humano

Como a córnea e o cristalino não estão perfeitamente centrados em relação à pupila, a aberração **coma** costuma estar presente em olhos humanos.



É percebido um objecto em forma de cometa quando o olho se encontra a observar um objecto pontual.

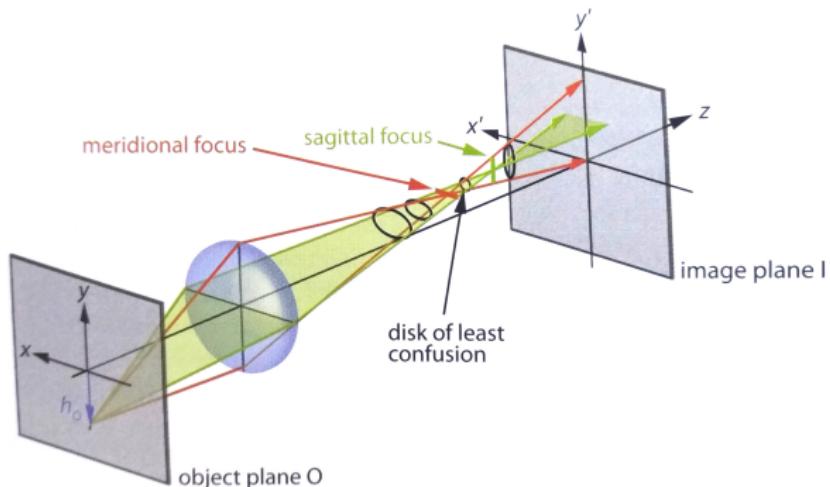


Um valor elevado de coma ( $0,3 \mu\text{m}$  de apenas coma) pode ser um indicador de alguns problemas da córnea, p.ex., queratocone.

# Aberrações monocromáticas

## Astigmatismo oblíquo

**Astigmatismo oblíquo** → quando o objecto pontual está situado fora do eixo óptico, o cone de raios incide no sistema óptico de modo assimétrico, originando astigmatismo.



# Aberrações monocromáticas

## Astigmatismo oblíquo

Img. retiniana

Óptica x retiniana  
Ametrop. corrigidas  
Ametrop. n corrigidas  
Furo estenopeico  
Difracção  
Critério de resolução

Aberrações

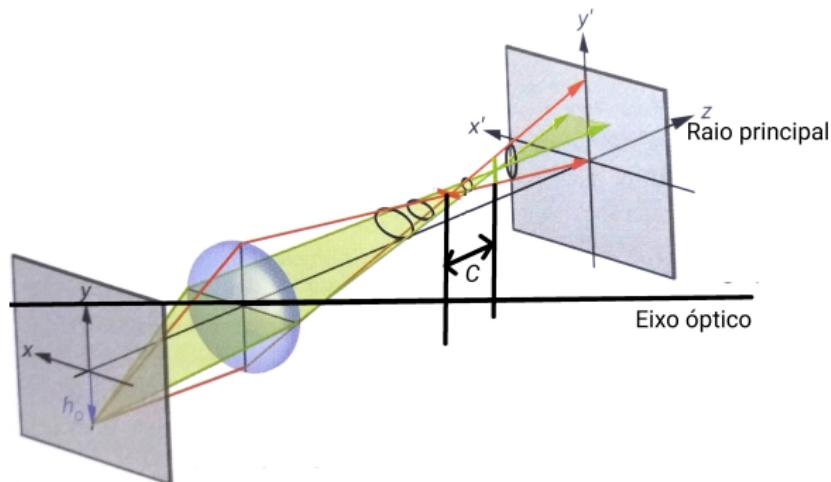
A. cromáticas  
A. monocromáticas  
Aberrometria

Avaliação qldd.

Diagramas de pontos  
Funções transfer.

Model. finitos

Navarro  
Liou-Brennan



### Astigmatismo oblíquo

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

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

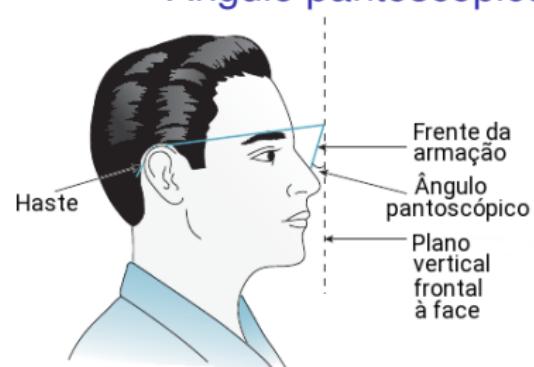
# Aberrações monocromáticas

## Astigmatismo oblíquo e lentes oftálmicas

### Ângulo de inclinação da face



### Ângulo pantoscópico



Schwartz,S.. Geometrical and Visual Optics: A Clinical Introduction. 3rd. Ed., McGrawHill, 2019.

# Aberrações monocromáticas

## Correcção do astigmatismo

Img. retiniana  
Óptica x retiniana  
Ametrop. corrigidas  
Ametrop. n corrigidas  
Furo estenopeico  
Difracção  
Critério de resolução

Aberrações  
A. cromáticas  
A. monocromáticas  
Aberrometria

Avaliação qdd.  
Diagramas de pontos  
Funções transfer.

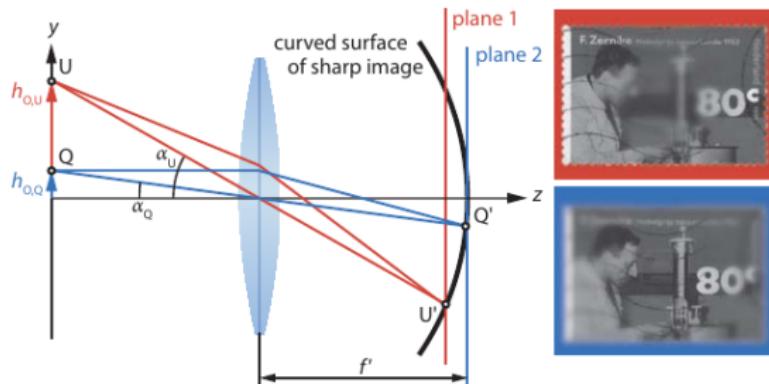
Model. finitos  
Navarro  
Liou-Brennan

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.**



Kaschke.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

Img. retiniana

Óptica x retiniana  
Ametrop. corrigidas  
Ametrop. n corrigidas  
Furo estenopeico  
Difracção  
Critério de resolução

Aberrações

A. cromáticas  
A. monocromáticas  
Aberrometria

Avaliaçao qldd.  
Diagramas de pontos  
Funções transfer.

Model. finitos

Navarro  
Liou-Brennan

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

- nestes casos, observa-se o [teorema de Petzval](#):

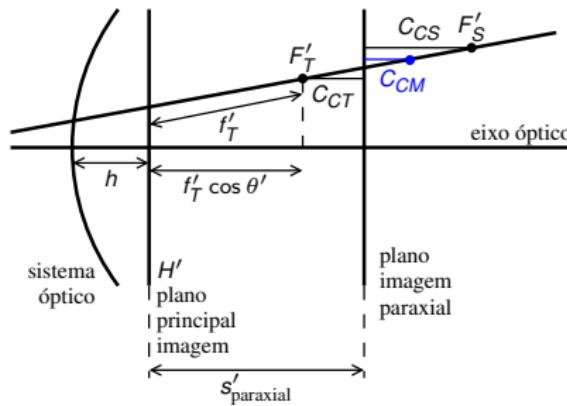
$$\frac{3}{r_S} - \frac{1}{r_T} = \frac{2}{r_P}$$



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

Img. retiniana

Óptica x retiniana  
Ametrop. corrigidas  
Ametrop. n corrigidas  
Furo estenopeico  
Difracção  
Critério de resolução

Aberrações

A. cromáticas  
A. monocromáticas  
Aberrometria

Avaliação qldd.  
Diagramas de pontos  
Funções transfer.

Model. finitos  
Navarro  
Liou-Brennan

### 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

Curvatura de campo — Olho humano

Img. retiniana

Óptica x retiniana  
Ametrop. corrigidas  
Ametrop. n corrigidas  
Furo estenopeico  
Difracção  
Critério de resolução

Aberrações

A. cromáticas  
A. monocromáticas  
Aberrometria

Avaliaçao qldd.

Diagramas de pontos  
Funções transfer.

Model. finitos

Navarro  
Liou-Brennan

Ter em conta que a retina também não é plana.



Pode existir uma ametropia na zona central da retina e  
outra ametropia diferente na zona periférica.

# Aberrações monocromáticas

Distorção

Img. retiniana

Óptica x retiniana  
Ametrop. corrigidas  
Ametrop. n corrigidas  
Furo estenopeico  
Difracção  
Critério de resolução

Aberrações

A. cromáticas  
A. monocromáticas  
Aberrometria

Avaliaçao qldd.

Diagramas de pontos  
Funções transfer.

Model. finitos

Navarro  
Liou-Brennan

**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 do sistema óptico.



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

# Aberrações monocromáticas

Distorção

Img. retiniana  
Óptica x retiniana  
Ametrop. corrigidas  
Ametrop. n corrigidas  
Furo estenopeico  
Difracção  
Critério de resolução

Aberrações  
A. cromáticas  
A. monocromáticas  
Aberrometria

Avaliação qldd.  
Diagramas de pontos  
Funções transfer.

Model. finitos  
Navarro  
Liou-Brennan



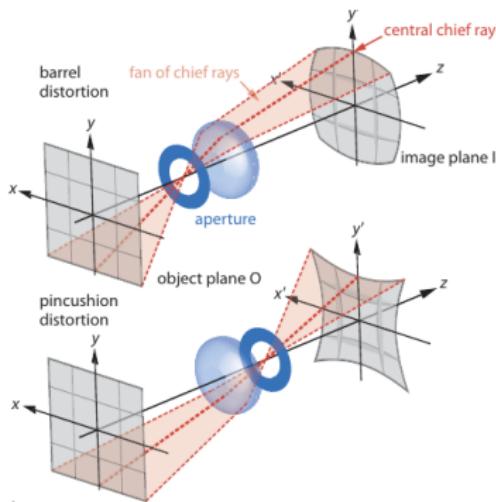
<https://www.techtudo.com.br/artigos/noticia/2012/02/aberracoes-fotograficas-e-como-contorna-las.html>

A **distorção em barril** resulta da redução da imagem devida a uma **lente negativa** 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:



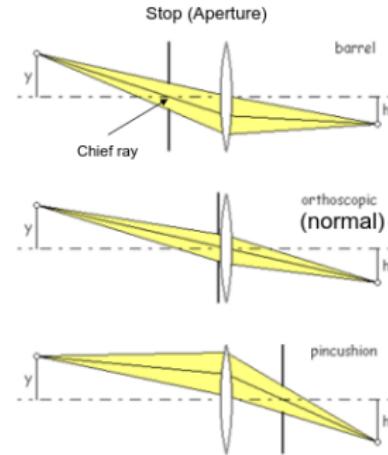
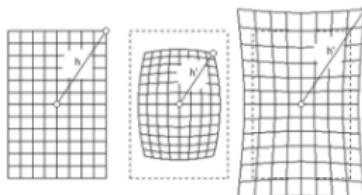
Distorção em barril

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/24/6966872/#>

- 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

Img. retiniana

Óptica x retiniana  
Ametrop. corrigidas  
Ametrop. n corrigidas  
Furo estenopeico  
Difracção  
Critério de resolução

Aberrações

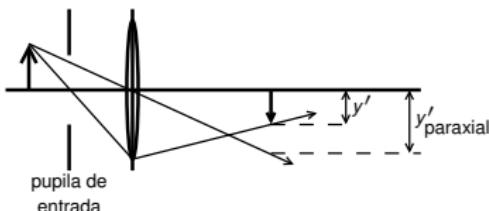
A. cromáticas  
A. monocromáticas  
Aberrometria

Avaliação qdd.

Diagramas de pontos  
Funções transfer.

Model. finitos

Navarro  
Liou-Brennan



### 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

Img. retiniana

Óptica x retiniana  
Ametrop. corrigidas  
Ametrop. n corrigidas  
Furo estenopeico  
Difracção  
Critério de resolução

Aberrações

A. cromáticas  
A. monocromáticas  
Aberrometria

Avaliação qldd.  
Diagramas de pontos  
Funções transfer.

Model. finitos  
Navarro  
Liou-Brennan

### 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**.

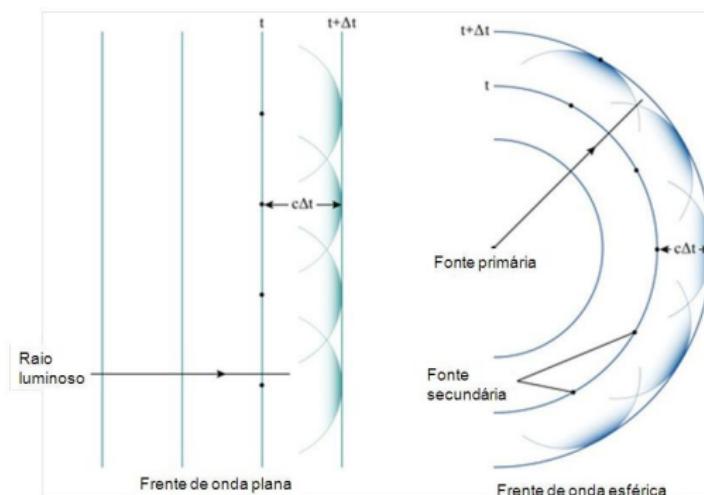
# Ondas e raios de luz

## 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**.



[http://images.slideplayer.com.br/2/359050/slides/slide\\_6.jpg](http://images.slideplayer.com.br/2/359050/slides/slide_6.jpg)

# Ondas e raios de luz

## Frentes de onda x Raios luminosos

### Img. retiniana

Óptica x retiniana  
Ametrop. corrigidas  
Ametrop. n corrigidas  
Furo estenopeico  
Difracção  
Critério de resolução

### Aberrações

A. cromáticas  
A. monocromáticas  
Aberrometria

### Avaliação qldd.

Diagramas de pontos  
Funções transfer.

### Model. finitos

Navarro  
Liou-Brennan

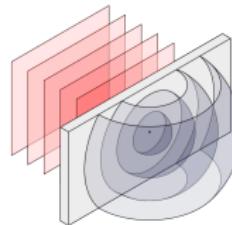
Tratar a luz como um conjunto de raios perpendiculares à **frente de onda** e com a mesma direcção de propagação desta, pode ser conveniente mas nem sempre é eficaz.



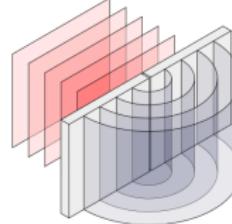
<https://www.mainstreetlaunch.org/the-racial-wealth-gap/>



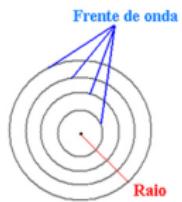
<https://scienceworld.scholastic.com/issues/2017-18/051418/making-waves.html#1090L>



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



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



Frente de onda

Raio



Frente de onda plana

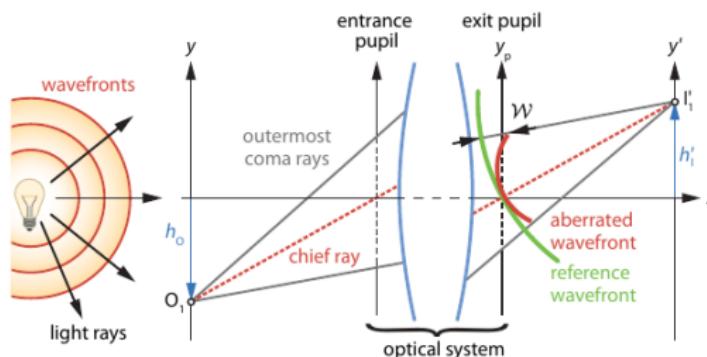
Raio

<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.



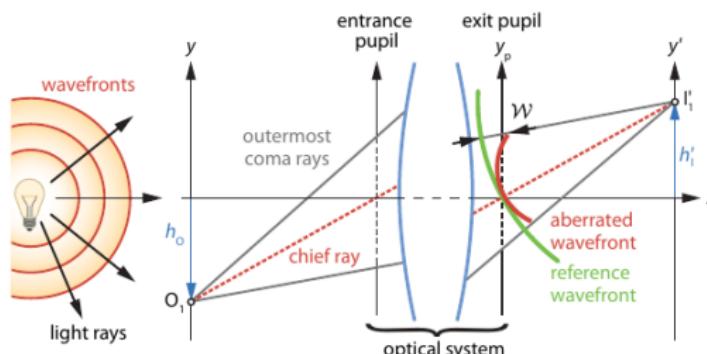
Kaschke,M., Donnerhacke,K.-H., Stefan Rill,M.. Optical Devices in Ophthalmology and Optometry: Technology, Design Principles, and Clinical Applications. Wiley-VCH, 2014.

- 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 Rill,M.. 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

### Img. retiniana

Óptica x retiniana  
Ametrop. corrigidas  
Ametrop. n corrigidas  
Furo estenopeico  
Difracção  
Critério de resolução

### Aberrações

A. cromáticas  
A. monocromáticas  
Aberrometria

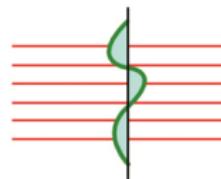
### Avaliação qdd.

Diagramas de pontos  
Funções transfer.

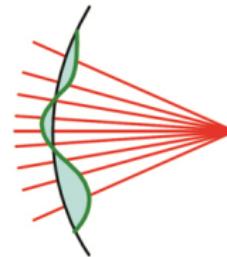
### Model. finitos

Navarro  
Liou-Brennan

**Frente de onda  
de referência plana**



**Frente de onda  
de referência esférica**



■ Aberração da onda  
■ Frente de onda com aberrações

[www.draandreia.com.br](http://www.draandreia.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**.

TABLE 15-1. ZERNIKE POLYNOMIALS AND THEIR SEIDEL ABERRATION EQUIVALENTS

Zernike Polynomial*	Seidel Aberration
Second order	Ametropia (defocus and astigmatism)
Third order	Coma and other aberrations
Fourth order	Spherical and other aberrations
Fifth to tenth orders	Irregular aberrations**

\* Data from Liang and Williams (1997).

\*\* Irregular aberrations are not present in spherical surfaces.

# Frente de onda

## Polinómios de Zernike

### Img. retiniana

Óptica x retiniana  
Ametrop. corrigidas  
Ametrop. n corrigidas  
Furo estenopeico  
Difracção  
Critério de resolução

### Aberrações

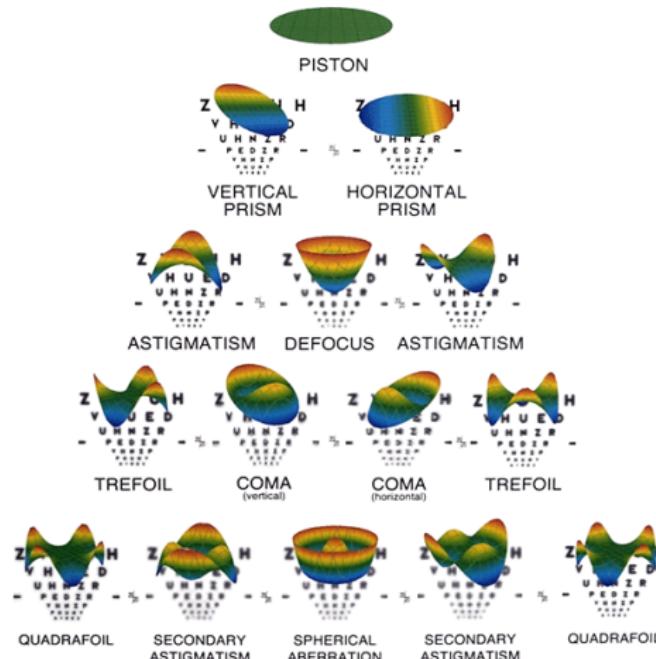
A. cromáticas  
A. monocromáticas  
Aberrometria

### Avaliação qldd.

Diagramas de pontos  
Funções transfer.

### Model. finitos

Navarro  
Liou-Brennan



# Frente de onda

## Aberrometria

As aberrações monocromáticas do olho humano podem ser medidas utilizando **aberrómetros**:

- um ponto luminoso é focado sobre a retina;
- a retina funciona como espelho côncavo e devolve a imagem desse ponto que tem de passar novamente pelos meios oculares;
- o padrão formado revela as aberrações monocromáticas do olho.

### Utilidade:

- com as aberrações corrigidas, a AV pode melhorar;
- a observação do fundo do olho torna-se mais clara.

Qualidade da  
imagem  
retiniana  
S. Mogo

Img. retiniana  
Óptica x retiniana  
Ametrop. corrigidas  
Ametrop. n corrigidas  
Furo estenopeico  
Difracção  
Critério de resolução

Aberrações  
A. cromáticas  
A. monocromáticas  
Aberrometria

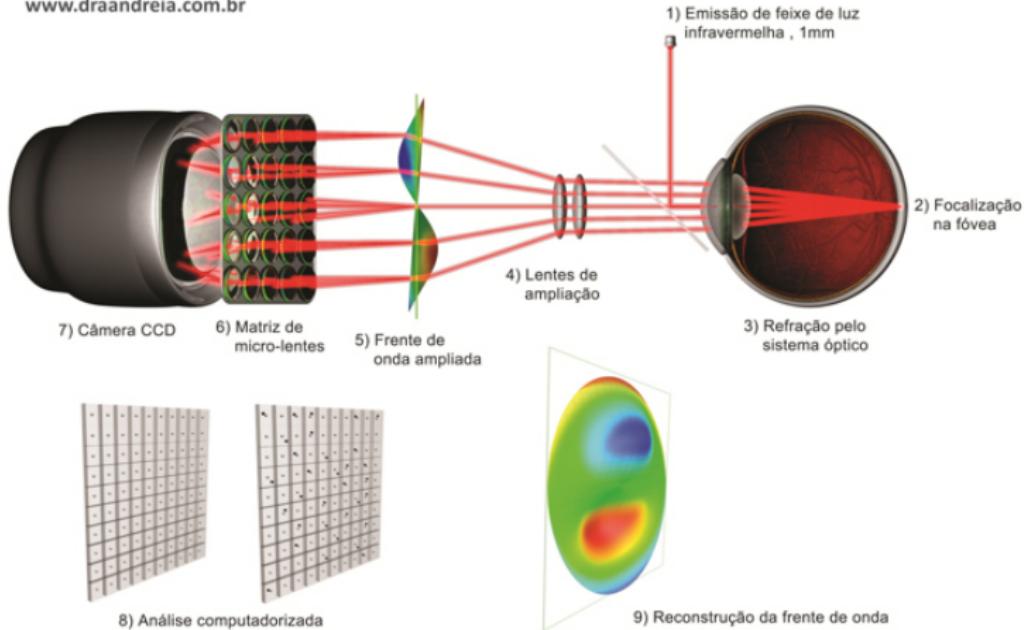
Avaliação qldd.  
Diagramas de pontos  
Funções transfer.

Model. finitos  
Navarro  
Liou-Brennan

# Frente de onda

## Aberrometria

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



Sensor de Frentes de Onda Shack-Hartmann - Exame de Aberrometria - Reconstrução da Frente de Onda

# Frente de onda

## Aberrometria

Img. retiniana  
Óptica x retiniana  
Ametrop. corrigidas  
Ametrop. n corrigidas  
Furo estenopeico  
Difracção  
Critério de resolução

Aberrações  
A. cromáticas  
A. monocromáticas  
Aberrometria

Avaliaçao qldd.  
Diagramas de pontos  
Funções transfer.

Model. finitos  
Navarro  
Liou-Brennan

Quando a pupila é maior que 3 mm, as aberrações podem interferir com a capacidade de percepção do detalhe.

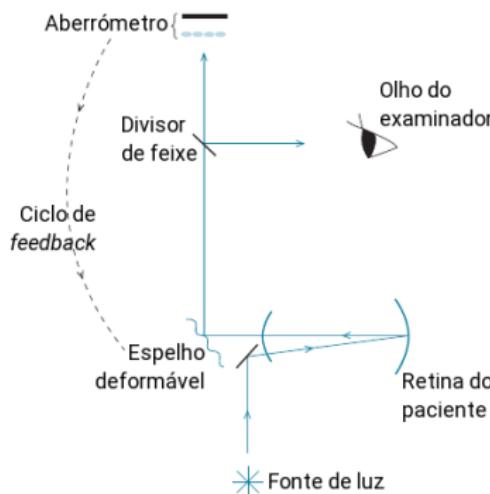


A compensação das aberrações pode melhorar a **sensibilidade ao contraste e a resolução**.

# Frente de onda

## Óptica adaptativa

A correção das aberrações monocromáticas do olho humano pode ser feita em laboratório utilizando técnicas de óptica adaptativa:

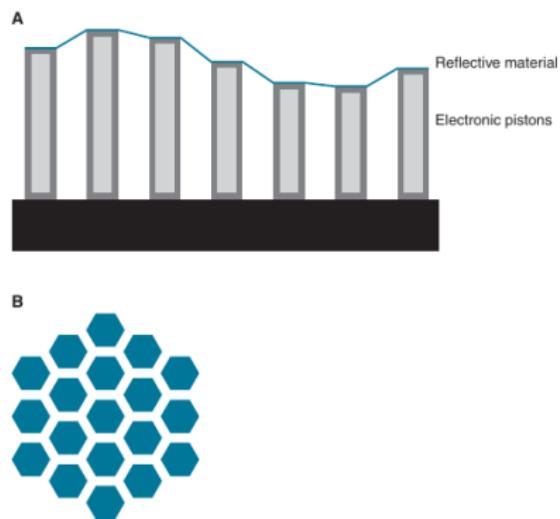


- utiliza-se um **espelho deformável** que permite adaptar a topografia da sua superfície, compensando as aberrações em cada momento.

# Frente de onda

## Óptica adaptativa

Cada pequena secção do espelho é controlada independentemente e ajustada de modo a permitir alterar a topografia do espelho e, assim, compensar a distorção da frente de onda.



# Richard Feynman

*in the Feynman Lectures on Physics*

Img. retiniana  
Óptica x retiniana  
Ametrop. corrigidas  
Ametrop. n corrigidas  
Furo estenopeico  
Difracção  
Critério de resolução

**Aberrações**  
A. cromáticas  
A. monocromáticas  
Aberrometria

**Avaliação qldd.**  
Diagramas de pontos  
Funções transfer.

**Model. finitos**  
Navarro  
Liou-Brennan

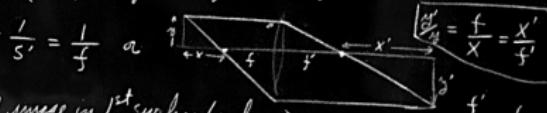
*"Geometrical optics is either very simple or else it is very complicated."*

Summary Lecture 28. Geom. Optics

In rays near axis, spherical surfaces form images as follows:

One surface  $\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = \frac{1}{f}$   $\frac{1}{f} = \frac{m-1}{R}$

Start at  $s=f$  (focus) makes rays // to axis in image plane ( $s'=\infty$ )  
Start // to axis ( $s=\infty$ ) rays converge at other focus  $s'=f'$ :  $\frac{f'}{m} = f$ .

Thin lens:  $\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = \frac{1}{f}$  or   $\frac{f'}{m} = \frac{f}{X} = \frac{f'}{f}$

General system: Find image in 1st surface (n. lens) + use as object for next surface, etc

[http://www.feynmanlectures.caltech.edu/I\\_27.html](http://www.feynmanlectures.caltech.edu/I_27.html)

Img. retiniana

Óptica x retiniana  
Ametrop. corrigidas  
Ametrop. n corrigidas  
Furo estenopeico  
Difracção  
Critério de resolução

Aberrações

A. cromáticas  
A. monocromáticas  
Aberrometria

Avaliação qldd.

Diagramas de pontos  
Funções transfer.

Model. finitos

Navarro  
Liou-Brennan

# Outline

1

## Imagen retiniana

Imagen óptica e imagen retiniana  
Imagen retiniana em ametropias corrigidas  
Imagen retiniana em ametropias não corrigidas  
Furo estenopeico  
Difracção  
Critérios de resolução

2

## Aberrações do olho

Aberrações cromáticas  
Aberrações monocromáticas  
Aberrometria

3

## Métricas de qualidade da imagem

Diagramas de pontos  
Funções de transferência

4

## Modelos esquemáticos do olho finitos

Modelo do olho de Navarro  
Modelo do olho de Liou-Brennan

# Qualidade óptica da imagem no olho ametropé

[Outra vez...](#)

Img. retiniana  
Óptica x retiniana  
Ametrop. corrigidas  
Ametrop. n corrigidas  
Furo estenopeico  
Difracção  
Critério de resolução

Aberrações  
A. cromáticas  
A. monocromáticas  
Aberrometria

Avaliação qldd.  
Diagramas de pontos  
Funções transfer.

Model. finitos  
Navarro  
Liou-Brennan

O **olho míope**, por ter o seu PR mais próximo de si, acomoda menos, e sofre também menos de todas as aberrações associadas ao aumento de potência do cristalino e à difracção no cristalino acomodado.



Por seu lado, o **olho hipermetropé**, ao estar sempre a acomodar, mesmo para a distância de longe, vai sofrer constantemente dos efeitos das aberrações e da difracção.

# Métricas de qualidade da imagem

Img. retiniana  
Óptica x retiniana  
Ametrop. corrigidas  
Ametrop. n corrigidas  
Furo estenopeico  
Difracção  
Critério de resolução

Aberrações  
A. cromáticas  
A. monocromáticas  
Aberrometria

Avaliação qldd.  
Diagramas de pontos  
Funções transfer.

Model. finitos  
Navarro  
Liou-Brennan

A medição precisa das aberrações do olho humano tem-se vindo a verificar difícil:

- por causa do **elevado grau de aberrações** presentes;
- por não percebermos bem como faz o cérebro para converter as imagens retinianas em **percepções visuais**.

# Métricas de qualidade da imagem

Img. retiniana

Óptica x retiniana  
Ametrop. corrigidas  
Ametrop. n corrigidas  
Furo estenopeico  
Difracção  
Critério de resolução

Aberrações

A. cromáticas  
A. monocromáticas  
Aberrometria

Avaliaçao qldd.  
Diagramas de pontos  
Funções transfer.

Model. finitos  
Navarro  
Liou-Brennan

O estudo da óptica visual requer a definição de **métricas comuns** que permitam especificar as imperfeições ópticas dos olhos.



As recomendações da OSA (*Optical Society of America*) para descrever as aberrações do olho de forma uniforme e consensual, incluem a definição de :

- eixos de referência;
- funções descritivas;
- modelos do olho.

# Contribuição para a limitação da AV

Img. retiniana

Óptica x retiniana  
Ametrop. corrigidas  
Ametrop. n corrigidas  
Furo estenopeico  
Difracção  
Critério de resolução

Aberrações

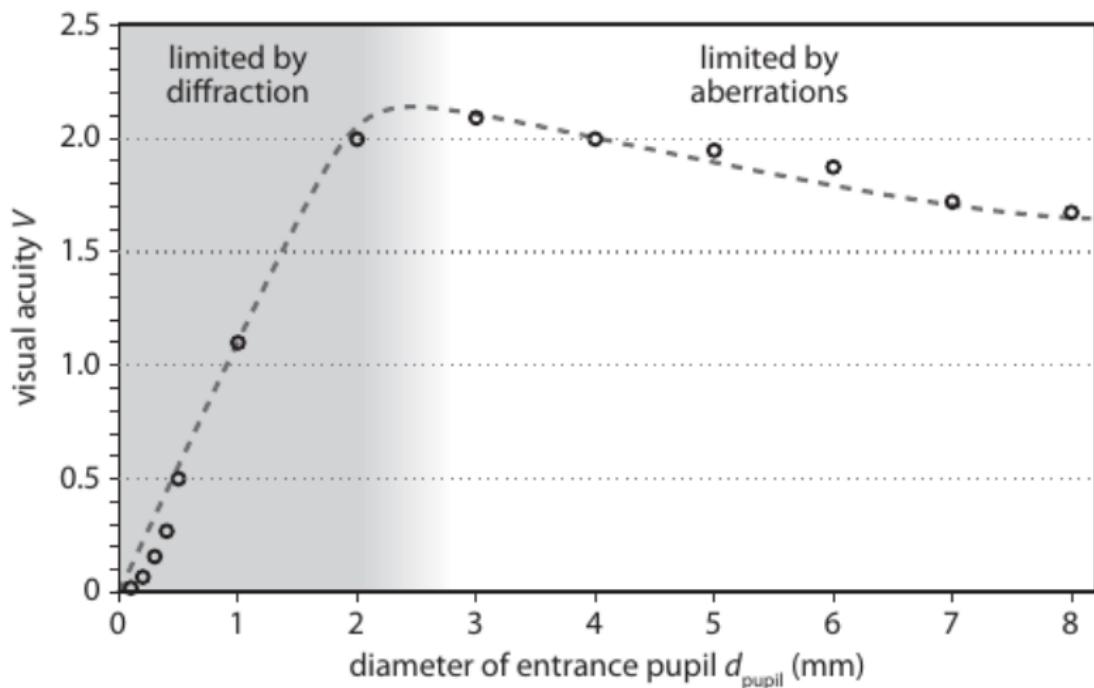
A. cromáticas  
A. monocromáticas  
Aberrometria

Avaliação qldd.

Diagramas de pontos  
Funções transfer.

Model. finitos

Navarro  
Liou-Brennan



# Contribuição para a limitação da AV

Img. retiniana

Óptica x retiniana  
Ametrop. corrigidas  
Ametrop. n corrigidas  
Furo estenopeico  
Difracção  
Critério de resolução

Aberrações

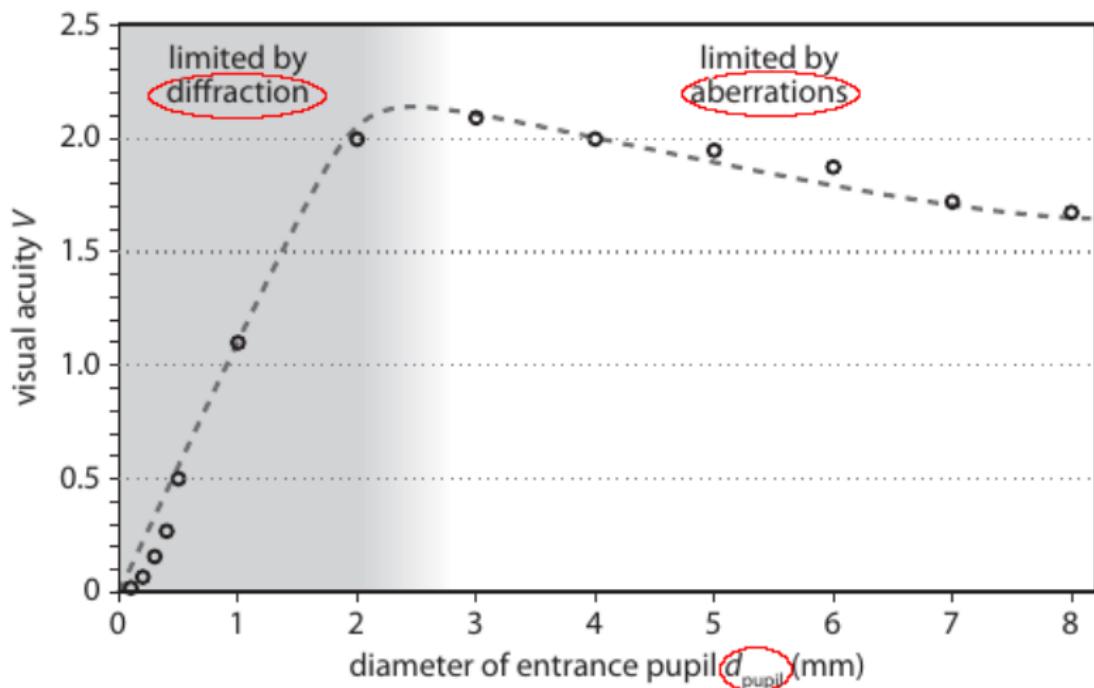
A. cromáticas  
A. monocromáticas  
Aberrometria

Avaliação qldd.

Diagramas de pontos  
Funções transfer.

Model. finitos

Navarro  
Liou-Brennan



# Métricas de qualidade da imagem

Img. retiniana  
Óptica x retiniana  
Ametrop. corrigidas  
Ametrop. n corrigidas  
Furo estenopeico  
Difracção  
Critério de resolução

Aberrações  
A. cromáticas  
A. monocromáticas  
Aberrometria

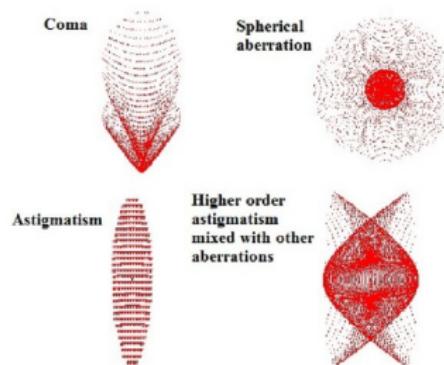
Avaliaçao qldd.  
Diagramas de pontos  
Funções transfer.

Model. finitos  
Navarro  
Liou-Brennan

- Diagramas de pontos
- Funções de transferência:
  - Resposta impulsional (PSF)
  - Função de transferência de modulação (FTM)
  - Função de transferência de fase (FTF)
  - Função de transferência óptica (FTO)

## Diagramas de pontos

Diagrama de pontos → esquema que mostra onde é que os raios provenientes de um ponto objecto, incidem no plano imagem.



<https://www.researchgate.net/>

- Os diagramas de pontos são óptimos para visualização;
- mas podem tornar-se difíceis de interpretar se existirem várias aberrações presentes.

# Diagramas de pontos

## Aberrometria de raios emergentes

Img. retiniana

Óptica x retiniana  
Ametrop. corrigidas  
Ametrop. n corrigidas  
Furo estenopeico  
Difracção  
Critério de resolução

Aberrações

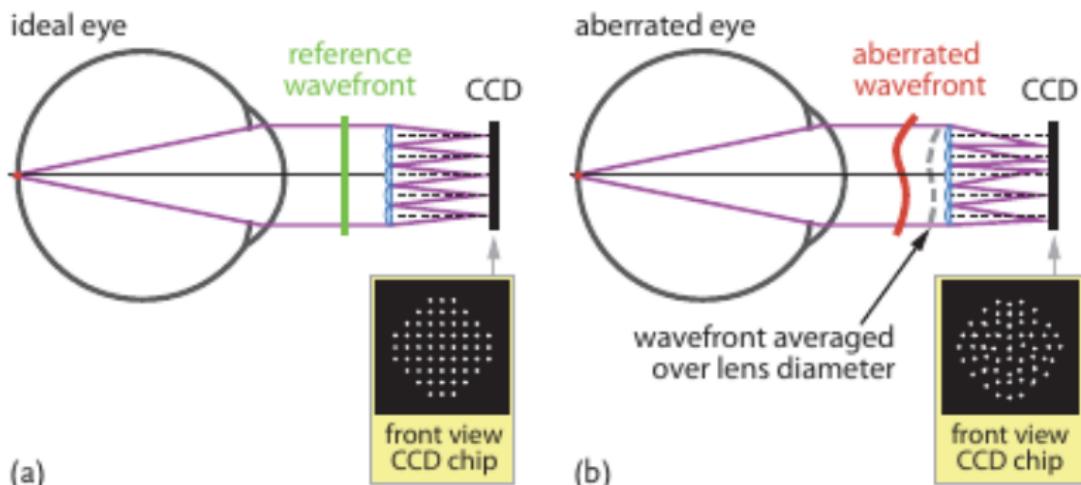
A. cromáticas  
A. monocromáticas  
Aberrometria

Avaliação qldd.  
Diagramas de pontos  
Funções transfer.

Model. finitos

Navarro  
Liou-Brennan

Utilização de diagramas de pontos para estudo da frente de onda detectada num **sensor de Hartmann-Shack**:



Qualidade da  
imagem  
retiniana  
S. Mogo

Img. retiniana

Óptica x retiniana  
Ametrop. corrigidas  
Ametrop. n corrigidas  
Furo estenopeico  
Difracção  
Critério de resolução

Aberrações

A. cromáticas  
A. monocromáticas  
Aberrometria

Avaliação qldd.

Diagramas de pontos  
Funções transfer.

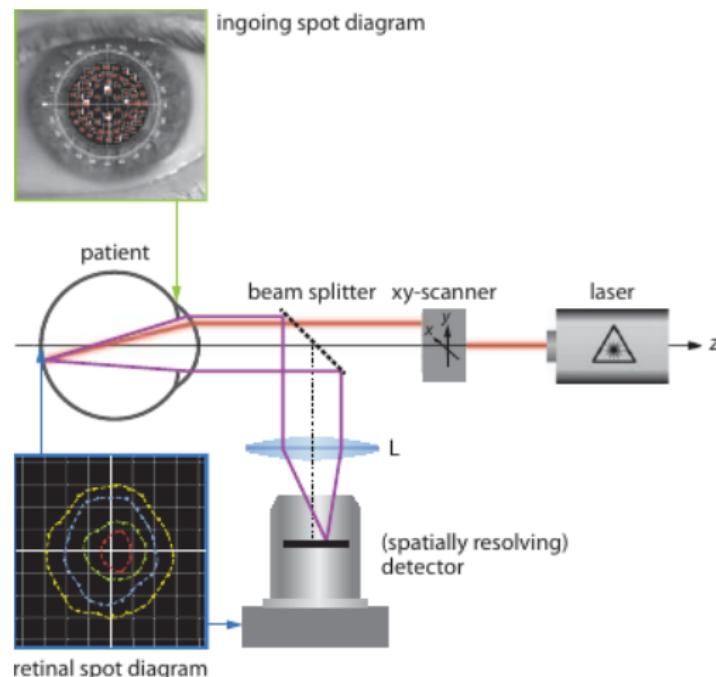
Model. finitos

Navarro  
Liou-Brennan

# Diagramas de pontos

Aberrometria de raios incidentes

Utilização de diagramas de pontos num **aberrómetro de traçado de raios**:



# Diagramas de pontos

## Aberrometria de raios incidentes

Img. retiniana

Óptica x retiniana  
Ametrop. corrigidas  
Ametrop. n corrigidas  
Furo estenopeico  
Difracção  
Critério de resolução

Aberrações

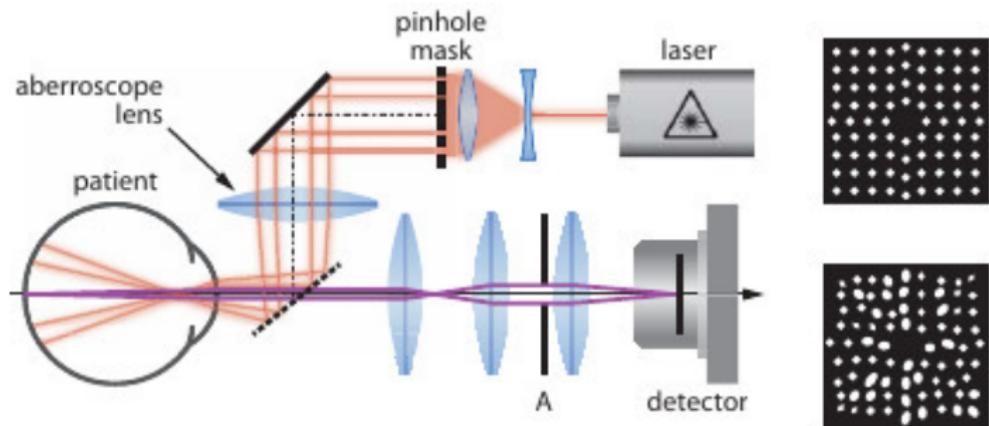
A. cromáticas  
A. monocromáticas  
Aberrometria

Avaliação qldd.  
Diagramas de pontos  
Funções transfer.

Model. finitos

Navarro  
Liou-Brennan

Utilização de diagramas de pontos num **aberrómetro de Tscherning**:



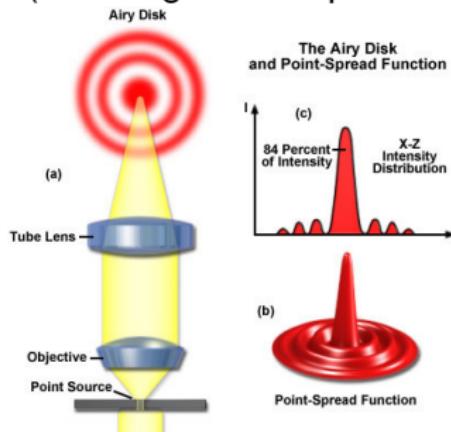
Kaschke,M., Donnerhacke,K.-H., Stefan Rill,M.. Optical Devices in Ophthalmology and Optometry: Technology, Design Principles, and Clinical Applications. Wiley-VCH, 2014.

# Resposta impulsional (PSF)

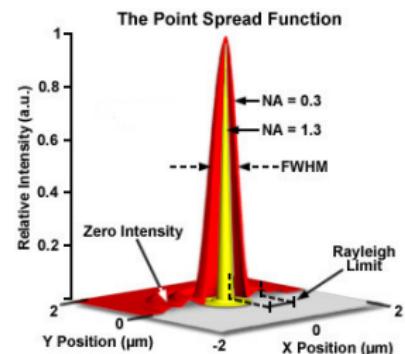
*Point spread function* = Função de espalhamento  
de ponto

**Resposta impulsional** → descreve a distribuição da intensidade luminosa na retina, da imagem correspondente a um objecto pontual.

(é a imagem de 1 ponto dada pelo olho e formada na retina)



<http://zeiss-campus.magnet.fsu.edu/print/basics/resolution-print.html>



<http://zeiss-campus.magnet.fsu.edu/print/basics/psf-print.html>

- A imagem de um ponto, não é um ponto mas sim uma mancha, devido a **aberrações** e **difracção**.

# Resposta impulsional (PSF)

*Point spread function* = Função de espalhamento  
de ponto

## Img. retiniana

Óptica x retiniana  
Ametrop. corrigidas  
Ametrop. n corrigidas  
Furo estenopeico  
Difracção  
Critério de resolução

## Aberrações

A. cromáticas  
A. monocromáticas  
Aberrometria

## Avaliação qldd.

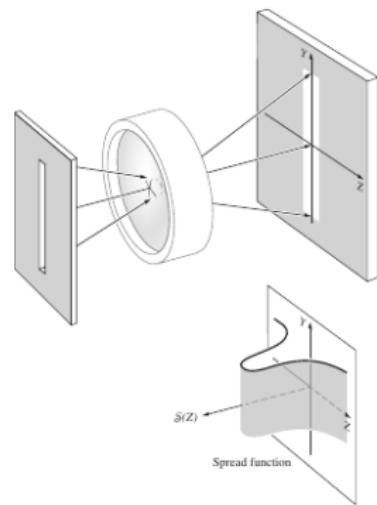
Diagramas de pontos  
Funções transfer.

## Model. finitos

Navarro  
Liou-Brennan

Se o **objecto for extenso**, pode ser tratado como um conjunto de fontes pontuais e independentes, cada uma produzindo a sua própria PSF. Estas PSF sobrepõem-se para formar a imagem do objecto.

Podemos também falar de **resposta impulsional de linha (LSF)**, que descreve a distribuição da energia luminosa na imagem de uma fonte linear infinitesimal.



# Resposta impulsional (PSF)

*Point spread function* = Função de espalhamento  
de ponto

## Img. retiniana

Óptica x retiniana  
Ametrop. corrigidas  
Ametrop. n corrigidas  
Furo estenopeico  
Difracção  
Critério de resolução

## Aberrações

A. cromáticas  
A. monocromáticas  
Aberrometria

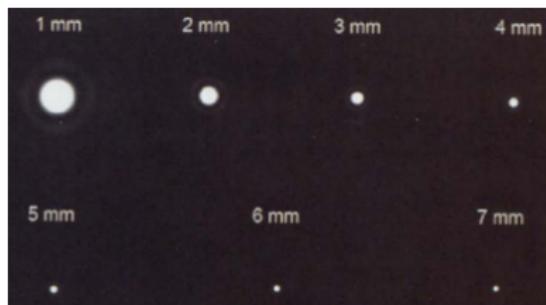
## Avaliação qldd.

Diagramas de pontos  
Funções transfer.

## Model. finitos

Navarro  
Liou-Brennan

Para um sistema óptico com uma abertura circular e sem aberrações a PSF assume a forma dos discos de Airy, onde o tamanho angular dos discos,  $\omega$ , depende do tamanho da pupila,  $\phi_{\text{pup}}$ , e do c.d.o.,  $\lambda$ :  $\omega = 2\theta = 2,44 \frac{\lambda}{\phi_{\text{pup}}}$ .



# Resposta impulsional (PSF)

*Point spread function = Função de espalhamento  
de ponto*

## Img. retiniana

Óptica x retiniana  
Ametrop. corrigidas  
Ametrop. n corrigidas  
Furo estenopeico  
Difracção  
Critério de resolução

## Aberrações

A. cromáticas  
A. monocromáticas  
Aberrometria

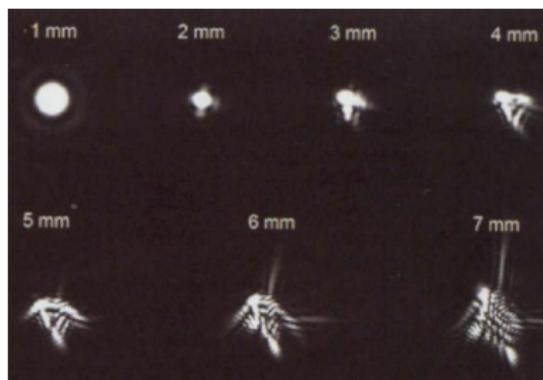
## Avaliação qld.

Diagramas de pontos  
Funções transfer.

## Model. finitos

Navarro  
Liou-Brennan

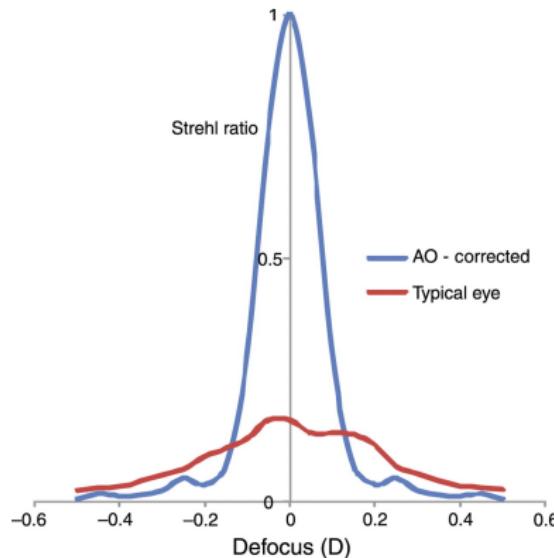
Para um sistema óptico com uma abertura circular e com aberrações a PSF assume formas características e degrada-se rapidamente com o aumento do diâmetro pupilar.



# Razão de Strehl

Razão de Strehl → expressa o quociente entre a altura do pico da PSF e a altura do pico para o mesmo sistema óptico se ele apenas fosse limitado por difracção.

$$S = \frac{I_{\max, \text{aberr}}}{I_{\max, \text{sem aberr}}}$$



# Raiz quadrada média da aberração

Img. retiniana  
Óptica x retiniana  
Ametrop. corrigidas  
Ametrop. n corrigidas  
Furo estenopeico  
Difracção  
Critério de resolução

## Aberrações

A. cromáticas  
A. monocromáticas  
Aberrometria

Avaliaçao qldd.  
Diagramas de pontos  
Funções transfer.

Model. finitos  
Navarro  
Liou-Brennan

**Raiz quadrada média da aberração** → é uma medida da amplitude da aberração da onda. Pode ser obtida calculando a raiz quadrada da média dos quadrados dos valores de todas as aberrações (polinómios de Zernike). Corresponde ao desvio padrão do erro da frente de onda.

# Função de transferência de modulação (FTM)

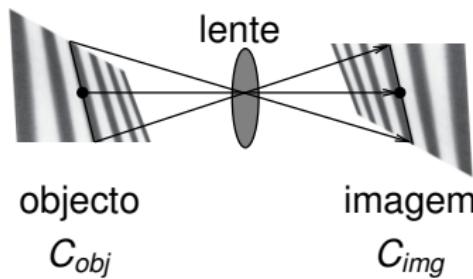
Função de transferência de modulação (FTM) → permite estudar para várias frequências espaciais, o contraste do objecto e da imagem.

$$C = \frac{L_{\max} - L_{\min}}{L_{\max} + L_{\min}}$$



# Função de transferência de modulação (FTM)

Para avaliar a qualidade com que uma lente (ou de qualquer sistema óptico) transmite a informação, vamos usar redes como objectos do sistema:



- medimos o contraste da rede objecto,  $C_{obj}$ ;
- medimos o contraste da rede imagem,  $C_{img}$ ;

↓  
Se a lente fosse perfeita

$$C_{img} = C_{obj}.$$

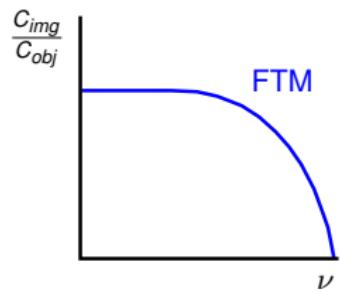
Na prática, existe sempre alguma degradação da imagem (as lentes não são perfeitas), logo,

$$C_{img} < C_{obj}.$$

A relação  $\frac{C_{img}}{C_{obj}}$  indica a qualidade com que a lente consegue transmitir informação.

## Função de transferência de modulação (FTM)

Determinando a relação  $\frac{C_{img}}{C_{obj}}$  para todas as frequências espaciais, obtém-se a **função de transferência de modulação**, MTF, da lente ou do sistema óptico.



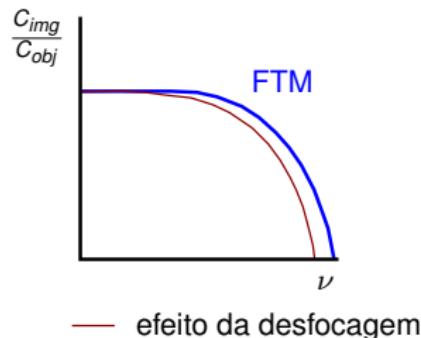
A FTM:

- representa a qualidade da imagem formada pelo sistema óptico;
- é característica de um sistema óptico.

- Para baixas e médias frequências  $\Rightarrow$  imagem transmitida com boa qualidade  $\Rightarrow$  pouca degradação;
  - Para altas frequências  $\Rightarrow$  imagem transmitida com menor qualidade  $\Rightarrow$  muita degradação.
- (devido às limitações de qualquer sistema óptico: aberrações, etc...)

# Função de transferência de modulação (FTM)

Efeito da desfocagem



Pode ocorrer quando se analisa a imagem fora do plano focal do sistema óptico.



Por exemplo no caso de uma ametropia.



Consequência: diminuição da qualidade da imagem a partir das altas frequências (com as baixas e médias pouco afectadas).

# Função de transferência de modulação (FTM)

Lente translúcida

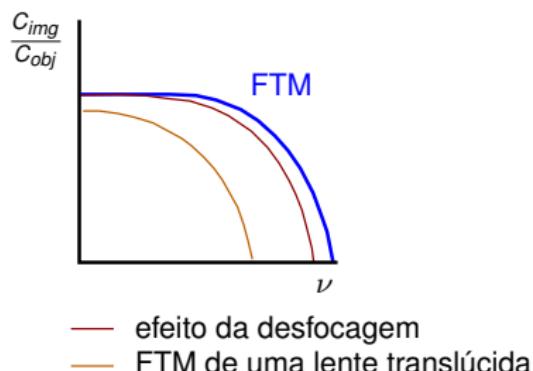
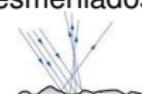
P.ex., filtros translúcidos usados em ambliopia ou um vidro esmerilado.



Consequência: a imagem é muito degradada em termos de contraste para todas as frequências espaciais.



Este efeito é devido à reflexão difusa na superfície irregular dos filtros / vidros esmerilados.



# Função de transferência de modulação (FTM)

Olho humano — Função de sensibilidade ao contraste

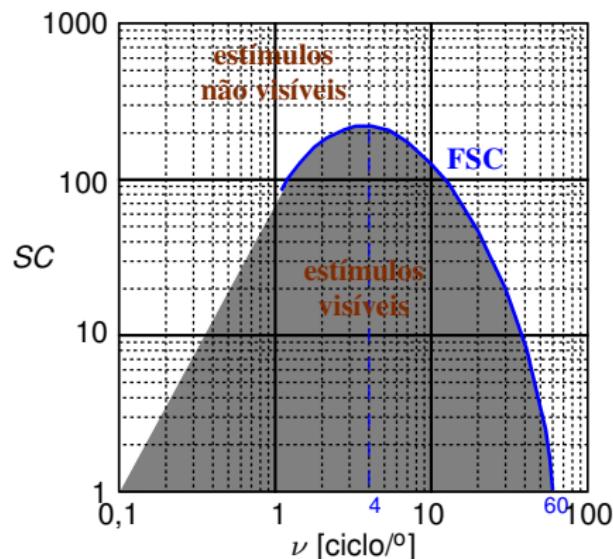
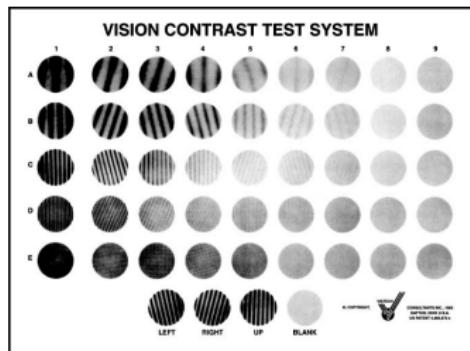
Img. retiniana  
Óptica x retiniana  
Ametrop. corrigidas  
Ametrop. n corrigidas  
Furo estenopeico  
Difracção  
Critério de resolução

## Aberrações

A. cromáticas  
A. monocromáticas  
Aberrometria

Avaliação qldd.  
Diagramas de pontos  
Funções transfer.

Model. finitos  
Navarro  
Liou-Brennan



# Função de transferência de fase (FTF)

Img. retiniana

Óptica x retiniana  
Ametrop. corrigidas  
Ametrop. n corrigidas  
Furo estenopeico  
Difracção  
Critério de resolução

Aberrações

A. cromáticas  
A. monocromáticas  
Aberrometria

Avaliaçao qldd.

Diagramas de pontos  
Funções transfer.

Model. finitos

Navarro  
Liou-Brennan

Função de transferência da fase → contabiliza variações de fase devidas a aberrações assimétricas como o coma ou o astigmatismo.



Quando as frequências espaciais de uma grelha são transferidas do plano objecto para o plano imagem, a localização das franjas claras e escuras pode também variar.

# Função de transferência óptica (FTO)

Img. retiniana

Óptica x retiniana  
Ametrop. corrigidas  
Ametrop. n corrigidas  
Furo estenopeico  
Difracção  
Critério de resolução

Aberrações

A. cromáticas  
A. monocromáticas  
Aberrometria

Avaliaçao qldd.

Diagramas de pontos  
Funções transfer.

Model. finitos

Navarro  
Liou-Brennan

Função de transferência óptica → função complexa cujo módulo é a FTM e a fase é a FTF.

$$FTP = FTMe^{iFTF}$$

- A FTM mede variações de contraste;
- a FTF mede variações de fase.

# Outline

1

## Imagen retiniana

Imagen óptica e imagen retiniana

Imagen retiniana em ametropias corrigidas

Imagen retiniana em ametropias não corrigidas

Furo estenopeico

Difracção

Critérios de resolução

2

## Aberrações do olho

Aberrações cromáticas

Aberrações monocromáticas

Aberrometria

3

## Métricas de qualidade da imagem

Diagramas de pontos

Funções transfer.

4

## Modelos esquemáticos do olho finitos

Modelo do olho de Navarro

Modelo do olho de Liou-Brennan

# Modelos esquemáticos do olho finitos

## Img. retiniana

Óptica x retiniana  
Ametrop. corrigidas  
Ametrop. n corrigidas  
Furo estenopeico  
Difracção  
Critério de resolução

## Aberrações

A. cromáticas  
A. monocromáticas  
Aberrometria

## Avaliaçao qldd.

Diagramas de pontos  
Funções transfer.

## Model. finitos

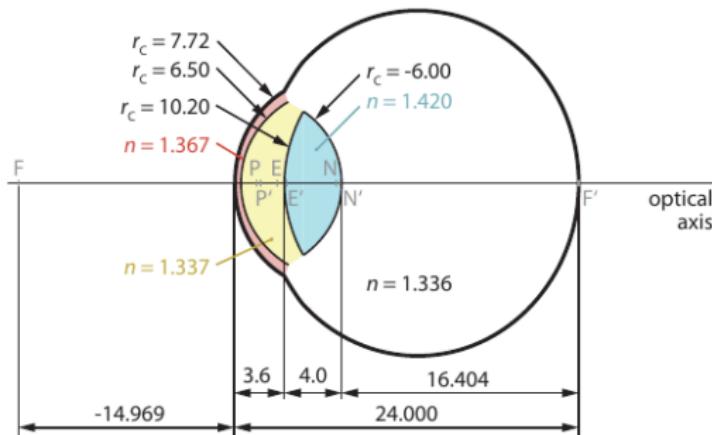
Navarro  
Liou-Brennan

## **Modelos esquemáticos do olho finitos:**

Permitem descrever a imagem formada pelo olho humano para raios não paraxiais e objectos situados fora do eixo.

# Modelo do olho de Navarro

As superfícies refractoras do olho são representadas por 4 superfícies asféricas centradas num eixo óptico comum.



Cada superfície é descrita por:  $x^2 + y^2 + (1 + Q)z^2 - r_C z = 0$ ,  
onde:

r<sub>C</sub> — raio de curvatura;

Q — parâmetro de asfericidade;

z — direcção do eixo óptico.

# Modelo do olho de Navarro

## Img. retiniana

Óptica x retiniana  
Ametrop. corrigidas  
Ametrop. n corrigidas  
Furo estenopeico  
Difracção  
Critério de resolução

## Aberrações

A. cromáticas  
A. monocromáticas  
Aberrometria

## Avaliação qldd.

Diagramas de pontos  
Funções transfer.

## Model. finitos

Navarro  
Liou-Brennan

Parameter	Relaxed vision (A = 0 D)	Accommodated vision (A = 10 D)
Location of object-side focal point F (mm)	-14.969	-12.051
Location of image-side focal point F' (mm)	24.004	21.172
Location of object-side nodal point N (mm)	7.145	6.727
Location of image-side nodal point N' (mm)	7.452	7.116
Location of object-side principal point P (mm)	1.583	2.005
Location of image-side principal point P' (mm)	1.890	2.393
Location of entrance pupil E (mm)	3.042	2.928
Location of exit pupil E' (mm)	3.682	3.551
Refractive power of cornea (D)	42.882	42.882
Refractive power of lens (D)	21.779	34.548
Refractive power of eye (D)	60.416	71.145
Total eye length (mm)	24.004	24.000

	$r_C$ (mm)	L (mm)	n	Q
Corneal front surface	7.72	-	-	-
Cornea	-	0.55	1.3670	-0.2600
Corneal back surface	6.50	-	-	-
Anterior chamber	-	$3.05 - L_2$	1.3374	0
Front surface of eye lens	$10.20 - r_{C3}$	-	-	-
Eye lens	-	$4.00 + L_3$	$1.4200 + n_3$	$-3.1316 - Q_3$
Back surface of eye lens	$-6.00 + r_{C4}$	-	-	-
Vitreous	-	16.403 98	1.3360	$-1.000 - Q_4$

# Modelo do olho de Liou-Brennan

Img. retiniana  
Óptica x retiniana  
Ametrop. corrigidas  
Ametrop. n corrigidas  
Furo estenopeico  
Difracção  
Critério de resolução

## Aberrações

A. cromáticas  
A. monocromáticas  
Aberrometria

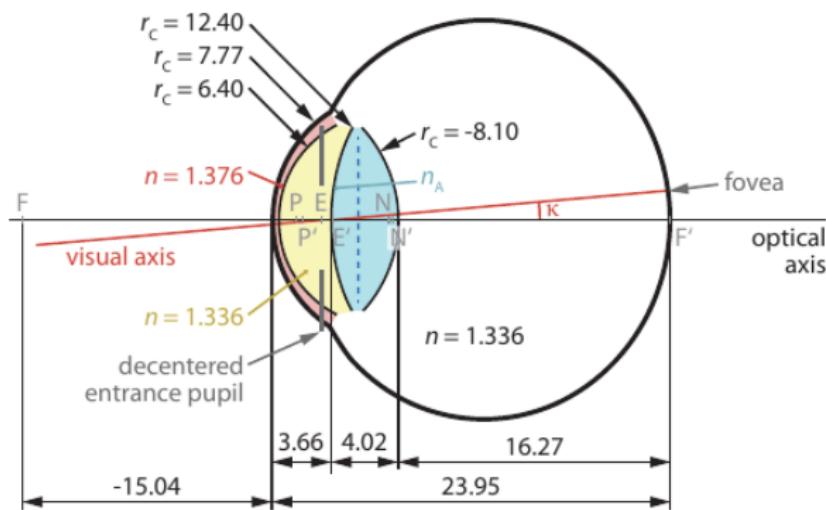
## Avaliação qldd.

Diagramas de pontos  
Funções transfer.

## Model. finitos

Navarro  
Liou-Brennan

Os parâmetros ópticos e geométricos são baseados em medições efectuadas em pacientes reais com cerca de 45 anos. Este modelo é muito usado para prever o desempenho visual antes e depois de cirurgias refractivas.



# Modelo do olho de Liou-Brennan

- Leva em conta o **descentramento** de um olho humano real: *eixo visual* faz um ângulo  $\kappa = 5^\circ$  com o *eixo óptico*;
- a íris é considerada como uma abertura circular situada em frente da superfície anterior do cristalino e descentrada 0,5 mm do eixo óptico, no sentido nasal;
- a *acomodação* não é tida em conta;
- a **dispersão** nos meios oculares é considerada semelhante à da água:  
$$\delta_{\text{água}} \approx 1,3847 - 0,1455 \mu\text{m}^{-1} \cdot \lambda + 0,0961 \mu\text{m}^{-2} \cdot \lambda^2$$
(onde  $\lambda [\mu\text{m}]$  é o c.d.o. da luz);
- as superfícies da córnea e do cristalino são **asféricas**;
- o cristalino tem índice de refracção variável.

### Img. retiniana

Óptica x retiniana  
Ametrop. corrigidas  
Ametrop. n corrigidas  
Furo estenopeico  
Difracção  
Critério de resolução

### Aberrações

A. cromáticas  
A. monocromáticas  
Aberrometria

### Avaliação qldd.

Diagramas de pontos  
Funções transfer.

### Model. finitos

Navarro  
Liou-Brennan

Parameter	Relaxed Vision
Location of object-side focal point F (mm)	-15.040
Location of image-side focal point F' (mm)	23.950
Location of object-side nodal point N (mm)	7.100
Location of image-side nodal point N' (mm)	7.378
Location of object-side principal point P (mm)	1.532
Location of image-side principal point P' (mm)	1.890
Location of entrance pupil E (mm)	3.098
Location of exit pupil E' (mm)	3.720
Refractive power of cornea (D)	42.262
Refractive power of lens (D)	22.134
Refractive power of eye (D)	60.314
Total eye length (mm)	23.950

	$r_c$ (mm)	$L$ (mm)	$n$	$Q$
Corneal front surface	7.77	-	-	-
Cornea	-	0.50	1.376	-0.18
Corneal back surface	6.40	-	-	-
Anterior chamber	-	3.16	1.336	-0.60
Front surface of eye lens	12.40	-	-	-
Eye lens (front segment)	-	1.59	$n_A$	-0.94
Lens center (dashed line Figure 2.15)	$\infty$	2.43	$n_p$	-
Back surface of eye lens	-8.10	-	-	-
Vitreous	-	16.27	1.336	0.96

# Modelo do olho de Liou-Brennan

Índice de refracção na superfície anterior do cristalino:  $n_A(\rho, z) = 1,368 + 0,049057 \mu\text{m}^{-1}z - 0,015427 \mu\text{m}^{-2}z^2 - 0,001978 \mu\text{m}^{-2}\rho^2$   
onde  $\rho[\mu\text{m}] = \sqrt{x^2 + y^2}$  é a coordenada normal à direcção de propagação da luz,  $z$ .



Índice de refracção no centro do cristalino:

$n_p(\rho, z) = 1,407 - 0,006605 \mu\text{m}^{-2}z^2 - 0,001978 \mu\text{m}^{-2}\rho^2$



$z, \rho[\mu\text{m}]$