

Capítulo 34 Ótica Geométrica

RODRIGO ALVES DIAS

Universidade Federal de Juiz de Fora - UFJF

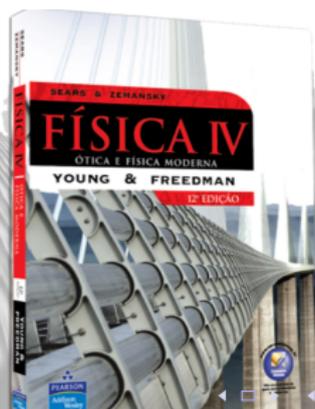
Livro texto: Física 3 - Eletromagnetismo

Autores: Sears e Zemansky

Edição: 12ª

Editora: Pearson - Addison and Wesley

10 de abril de 2014



Objetivos de Aprendizagem

Ao estudar este capítulo você aprenderá:

- ▶ Como um espelho plano forma uma imagem.

Objetivos de Aprendizagem

Ao estudar este capítulo você aprenderá:

- ▶ Como um espelho plano forma uma imagem.
- ▶ Por que espelhos côncavos e espelhos convexos formam tipos diferentes de imagem.

Objetivos de Aprendizagem

Ao estudar este capítulo você aprenderá:

- ▶ Como um espelho plano forma uma imagem.
- ▶ Por que espelhos côncavos e espelhos convexos formam tipos diferentes de imagem.
- ▶ Como as imagens se formam com uma interface curva entre dois materiais transparentes.

Objetivos de Aprendizagem

Ao estudar este capítulo você aprenderá:

- ▶ Como um espelho plano forma uma imagem.
- ▶ Por que espelhos côncavos e espelhos convexos formam tipos diferentes de imagem.
- ▶ Como as imagens se formam com uma interface curva entre dois materiais transparentes.
- ▶ Que aspectos de uma lente determinam o tipo de imagem que ela produz.

Objetivos de Aprendizagem

Ao estudar este capítulo você aprenderá:

- ▶ Como um espelho plano forma uma imagem.
- ▶ Por que espelhos côncavos e espelhos convexos formam tipos diferentes de imagem.
- ▶ Como as imagens se formam com uma interface curva entre dois materiais transparentes.
- ▶ Que aspectos de uma lente determinam o tipo de imagem que ela produz.
- ▶ O que determina o campo de visão da lente de uma máquina fotográfica.

Objetivos de Aprendizagem

Ao estudar este capítulo você aprenderá:

- ▶ Como um espelho plano forma uma imagem.
- ▶ Por que espelhos côncavos e espelhos convexos formam tipos diferentes de imagem.
- ▶ Como as imagens se formam com uma interface curva entre dois materiais transparentes.
- ▶ Que aspectos de uma lente determinam o tipo de imagem que ela produz.
- ▶ O que determina o campo de visão da lente de uma máquina fotográfica.
- ▶ O que causa os diversos defeitos da visão humana, e como eles podem ser corrigidos.

Objetivos de Aprendizagem

Ao estudar este capítulo você aprenderá:

- ▶ Como um espelho plano forma uma imagem.
- ▶ Por que espelhos côncavos e espelhos convexos formam tipos diferentes de imagem.
- ▶ Como as imagens se formam com uma interface curva entre dois materiais transparentes.
- ▶ Que aspectos de uma lente determinam o tipo de imagem que ela produz.
- ▶ O que determina o campo de visão da lente de uma máquina fotográfica.
- ▶ O que causa os diversos defeitos da visão humana, e como eles podem ser corrigidos.
- ▶ O princípio da lupa simples.

Objetivos de Aprendizagem

Ao estudar este capítulo você aprenderá:

- ▶ Como um espelho plano forma uma imagem.
- ▶ Por que espelhos côncavos e espelhos convexos formam tipos diferentes de imagem.
- ▶ Como as imagens se formam com uma interface curva entre dois materiais transparentes.
- ▶ Que aspectos de uma lente determinam o tipo de imagem que ela produz.
- ▶ O que determina o campo de visão da lente de uma máquina fotográfica.
- ▶ O que causa os diversos defeitos da visão humana, e como eles podem ser corrigidos.
- ▶ O princípio da lupa simples.
- ▶ Como funcionam os microscópios e telescópios.

- ▶ **Objeto em ótica:** É qualquer coisa da qual emanem raios de luz.

- ▶ **Objeto em ótica:** É qualquer coisa da qual emanem raios de luz.
- ▶ Luz emitida pelo próprio objeto: dizemos que possui luz própria.

- ▶ **Objeto em ótica:** É qualquer coisa da qual emanem raios de luz.
- ▶ Luz emitida pelo proprio objeto: dizemos que possui luz propria.
- ▶ A luz depois de emitida por uma fonte, reflete no objeto.

- ▶ **Objeto em ótica:** É qualquer coisa da qual emanem raios de luz.
- ▶ Luz emitida pelo próprio objeto: dizemos que possui luz própria.
- ▶ A luz depois de emitida por uma fonte, reflete no objeto.
- ▶ A raios de luz irradiados em todas as direções por um objeto no ponto P.



- ▶ **Objeto em ótica:** É qualquer coisa da qual emanem raios de luz.
- ▶ Luz emitida pelo próprio objeto: dizemos que possui luz própria.
- ▶ A luz depois de emitida por uma fonte, reflete no objeto.
- ▶ A raios de luz irradiados em todas as direções por um objeto no ponto P .
- ▶ Para o observador ver diretamente o objeto não pode existir obstáculos entre o objeto e o observador.

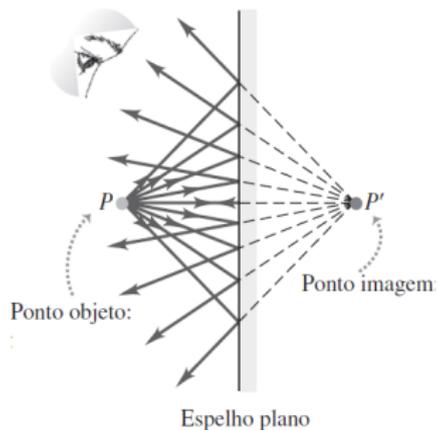


- ▶ **Objeto em ótica:** É qualquer coisa da qual emanem raios de luz.
- ▶ Luz emitida pelo próprio objeto: dizemos que possui luz própria.
- ▶ A luz depois de emitida por uma fonte, reflete no objeto.
- ▶ A raios de luz irradiados em todas as direções por um objeto no ponto P.
- ▶ Para o observador ver diretamente o objeto não pode existir obstáculos entre o objeto e o observador.
- ▶ **Objeto pontual:** é representado por um ponto que não possui nenhuma dimensão..

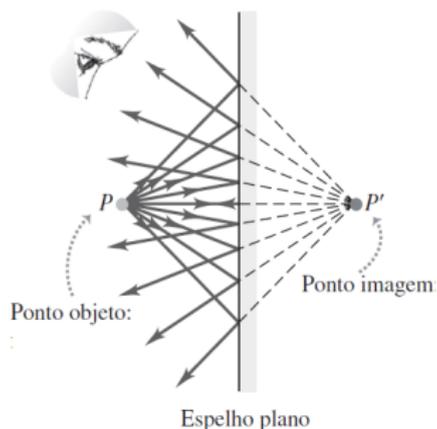


- ▶ **Objeto em ótica:** É qualquer coisa da qual emanem raios de luz.
- ▶ Luz emitida pelo próprio objeto: dizemos que possui luz própria.
- ▶ A luz depois de emitida por uma fonte, reflete no objeto.
- ▶ A raios de luz irradiados em todas as direções por um objeto no ponto P.
- ▶ Para o observador ver diretamente o objeto não pode existir obstáculos entre o objeto e o observador.
- ▶ **Objeto pontual:** é representado por um ponto que não possui nenhuma dimensão..
- ▶ **Objetos reais(extensos):** possuem comprimento, largura e altura, são um conjunto grande de objetos pontuais.





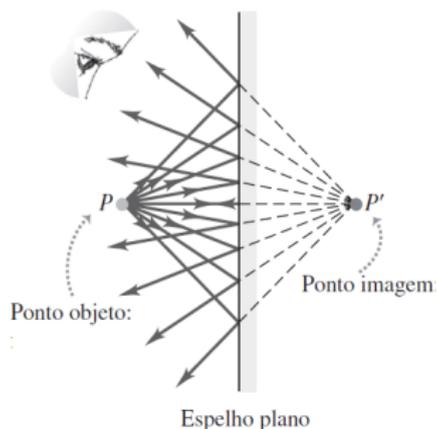
- Suponha raios provenientes de um objeto atinjam uma superfície plana refletora.



- Suponha raios provenientes de um objeto atinjam uma superfície plana refletora.

Superfície refletora:

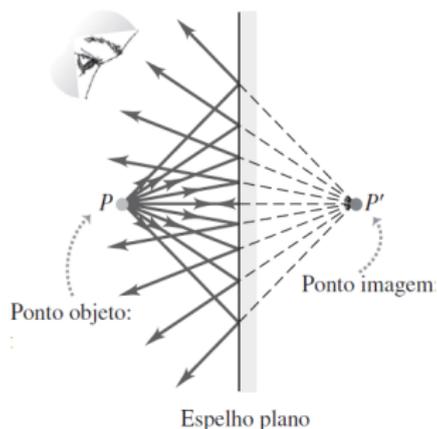
- Material com índice de refração diferente, que reflete parte da luz incidente.



- ▶ Suponha raios provenientes de um objeto atinjam uma superfície plana refletora.

Superfície refletora:

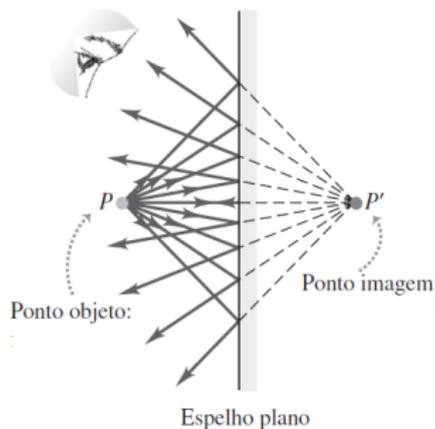
- ▶ Material com índice de refração diferente, que reflete parte da luz incidente.
- ▶ Superfície metálica polida que reflete quase 100% da luz incidente.



- ▶ Suponha raios provenientes de um objeto atinjam uma superfície plana refletora.

Superfície refletora:

- ▶ Material com índice de refração diferente, que reflete parte da luz incidente.
- ▶ Superfície metálica polida que reflete quase 100% da luz incidente.
- ▶ Representaremos uma superfície refletora como uma linha com um sombreado na parte traseira da interface.

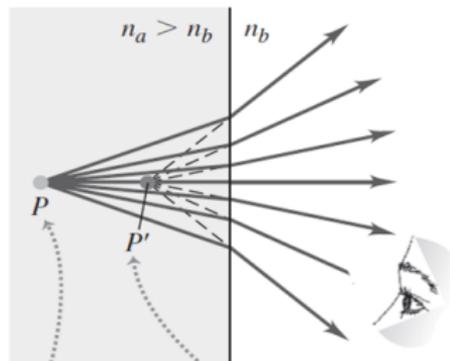


- ▶ Suponha raios provenientes de um objeto atinjam uma superfície plana refletora.

Superfície refletora:

- ▶ Material com índice de refração diferente, que reflete parte da luz incidente.
- ▶ Superfície metálica polida que reflete quase 100% da luz incidente.
- ▶ Representaremos uma superfície refletora como uma linha com um sombreado na parte traseira da interface.
- ▶ Superfície plana: a normal é \perp superfície em todos os seus pontos. Reflexão especular.

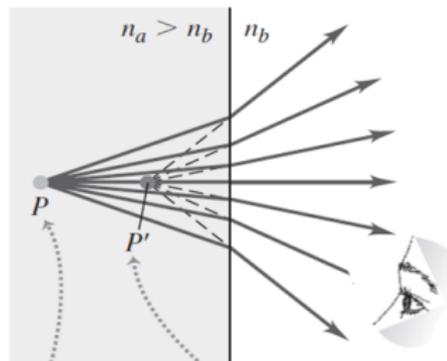
- Uma imagem também é formada por uma superfície plana refratora.



Ponto objeto: Ponto imagem:
 Quando $n_a > n_b$, P' está mais perto da
 superfície do que P ;

quando $n_a < n_b$, ocorre o inverso

- ▶ Uma imagem também é formada por uma superfície plana refratora.
- ▶ Os raios provenientes de um ponto P são refratados na interface entre dois materiais transparentes.

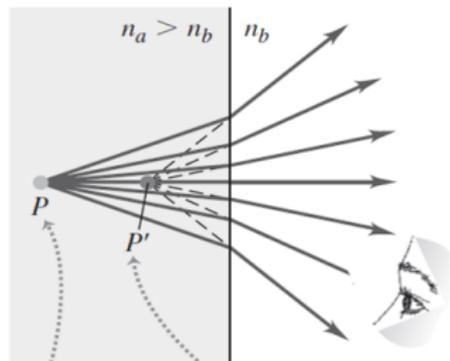


Ponto objeto: Ponto imagem:
 Quando $n_a > n_b$, P' está mais perto da
 superfície do que P ;

quando $n_a < n_b$, ocorre o inverso

Reflexão e Refração em uma Superfície Plana

- ▶ Uma imagem também é formada por uma superfície plana refratora.
- ▶ Os raios provenientes de um ponto P são refratados na interface entre dois materiais transparentes.
- ▶ Para pequenos ângulos de incidência as direções dos raios depois da refração são as mesmas caso tivessem vindo do ponto P' .

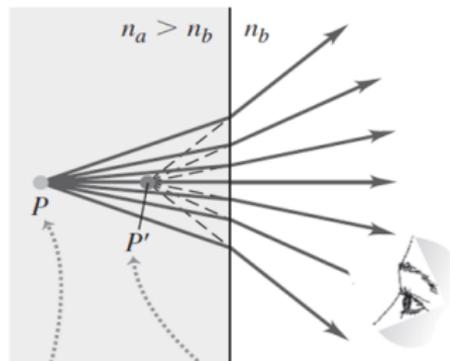


Ponto objeto: Ponto imagem:
 Quando $n_a > n_b$, P' está mais perto da
 superfície do que P ;

quando $n_a < n_b$, ocorre o inverso

Reflexão e Refração em uma Superfície Plana

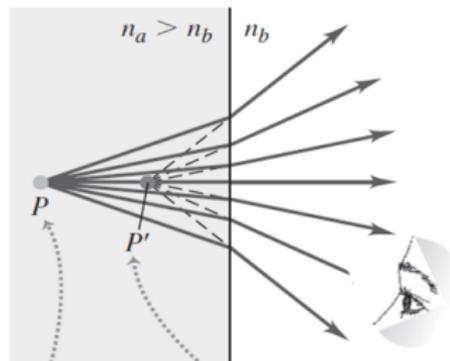
- ▶ Uma imagem também é formada por uma superfície plana refratora.
- ▶ Os raios provenientes de um ponto P são refratados na interface entre dois materiais transparentes.
- ▶ Para pequenos ângulos de incidência as direções dos raios depois da refração são as mesmas caso tivessem vindo do ponto P' .
- ▶ **Imagem virtual:** Os raios **não passam** pelo ponto onde se encontra o objeto.



Ponto objeto: Ponto imagem:
 Quando $n_a > n_b$, P' está mais perto da
 superfície do que P ;

quando $n_a < n_b$, ocorre o inverso

- ▶ Uma imagem também é formada por uma superfície plana refratora.
- ▶ Os raios provenientes de um ponto P são refratados na interface entre dois materiais transparentes.
- ▶ Para pequenos ângulos de incidência as direções dos raios depois da refração são as mesmas caso tivessem vindo do ponto P' .
- ▶ **Imagem virtual:** Os raios **não passam** pelo ponto onde se encontra o objeto.
- ▶ **Imagens reais:** Os raios **passam** pelo ponto onde se encontra o objeto.

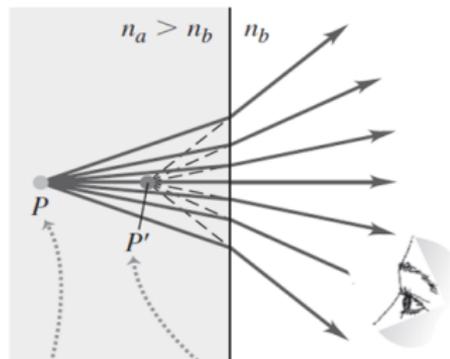


Ponto objeto: Ponto imagem:
 Quando $n_a > n_b$, P' está mais perto da
 superfície do que P ;

quando $n_a < n_b$, ocorre o inverso

Reflexão e Refração em uma Superfície Plana

- ▶ Uma imagem também é formada por uma superfície plana refratora.
- ▶ Os raios provenientes de um ponto P são refratados na interface entre dois materiais transparentes.
- ▶ Para pequenos ângulos de incidência as direções dos raios depois da refração são as mesmas caso tivessem vindo do ponto P' .
- ▶ **Imagem virtual:** Os raios **não passam** pelo ponto onde se encontra o objeto.
- ▶ **Imagens reais:** Os raios **passam** pelo ponto onde se encontra o objeto.

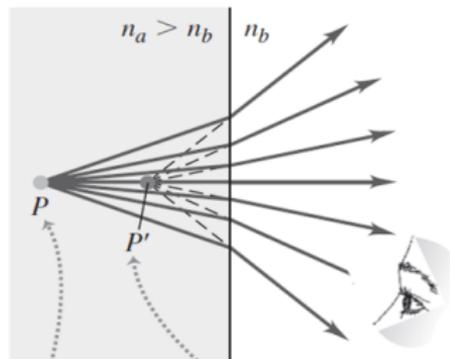


Ponto objeto: Ponto imagem:
 Quando $n_a > n_b$, P' está mais perto da
 superfície do que P ;

quando $n_a < n_b$, ocorre o inverso

Reflexão e Refração em uma Superfície Plana

- ▶ Uma imagem também é formada por uma superfície plana refratora.
- ▶ Os raios provenientes de um ponto P são refratados na interface entre dois materiais transparentes.
- ▶ Para pequenos ângulos de incidência as direções dos raios depois da refração são as mesmas caso tivessem vindo do ponto P' .
- ▶ **Imagem virtual:** Os raios **não passam** pelo ponto onde se encontra o objeto.
- ▶ **Imagens reais:** Os raios **passam** pelo ponto onde se encontra o objeto.



Ponto objeto: Ponto imagem:
 Quando $n_a > n_b$, P' está mais perto da
 superfície do que P ;

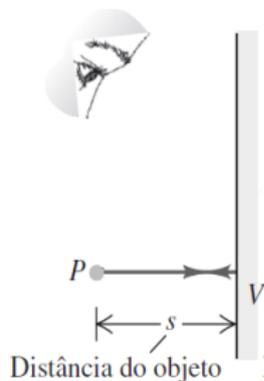
quando $n_a < n_b$, ocorre o inverso

Formação de imagem em um espelho plano

- ▶ Imagens formadas por reflexão.

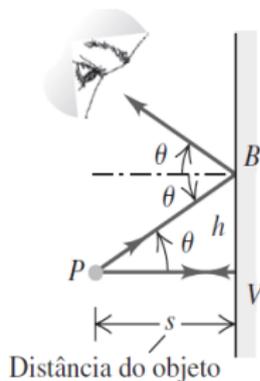
Formação de imagem em um espelho plano

- ▶ Imagens formadas por reflexão.
- ▶ A distância s a esquerda do espelho é **distância do objeto**.



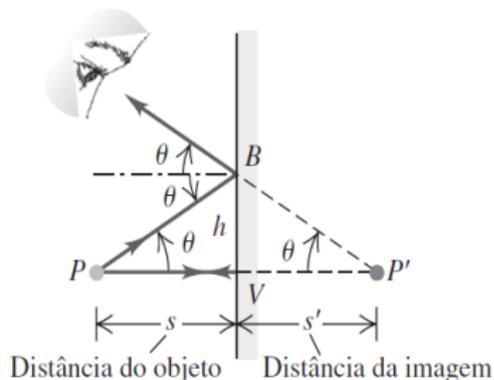
Formação de imagem em um espelho plano

- ▶ Imagens formadas por reflexão.
- ▶ A distância s a esquerda do espelho é **distância do objeto**.
- ▶ O ponto P' obtido prolongando os dois raios refletidos trás do espelho, definem s' (**distância da imagem**).



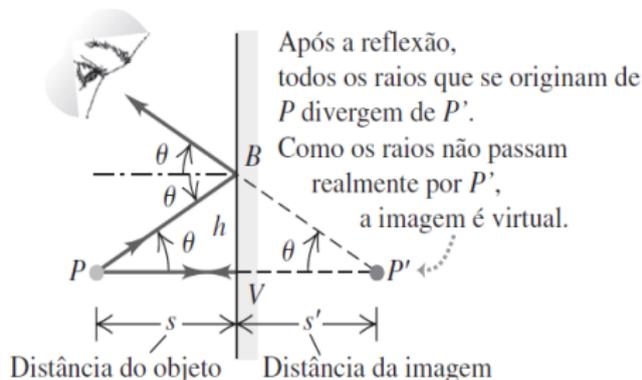
Formação de imagem em um espelho plano

- ▶ Imagens formadas por reflexão.
- ▶ A distância s a esquerda do espelho é **distância do objeto**.
- ▶ O ponto P' obtido prolongando os dois raios refletidos trás do espelho, definem s' (**distância da imagem**).
- ▶ A linha que liga P com P' é perpendicular ao espelho.



Formação de imagem em um espelho plano

- ▶ Imagens formadas por reflexão.
- ▶ A distância s a esquerda do espelho é **distância do objeto**.
- ▶ O ponto P' obtido prolongando os dois raios refletidos trás do espelho, definem s' (**distância da imagem**).
- ▶ A linha que liga P com P' é perpendicular ao espelho.
- ▶ Os dois triângulos são congruentes, de modo que P e P' possuem distâncias iguais ate o espelho, logo, $|s| = |s'|$.



Regra de sinais

- ▶ Aplicadas para qualquer situação.

Regra de sinais

- ▶ Aplicadas para qualquer situação.
- ▶ Formação de imagens por:
- ▶ reflexão, refração em interfaces planas ou esféricas.

Regra de sinais

- ▶ Aplicadas para qualquer situação.
- ▶ Formação de imagens por:
 - ▶ reflexão, refração em interfaces planas ou esféricas.
 - ▶ par de superfícies refratoras que formam uma lente.

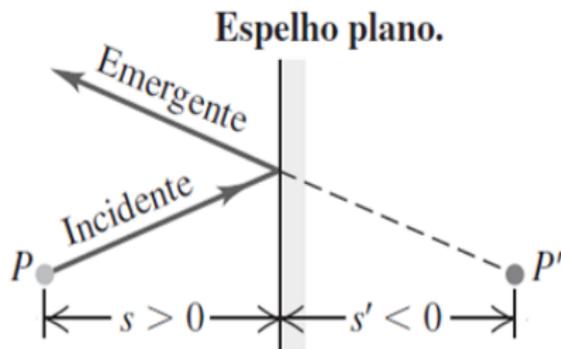
Regra de sinais

1. **Sinal para a distância do objeto:** Objeto do mesmo lado da luz que incide sobre a superfície refletora ou refratora, a distância do objeto s é positiva; caso contrario é negativa.

Regra de sinais

1. **Sinal para a distância do objeto:** Objeto do mesmo lado da luz que incide sobre a superfície refletora ou refratora, a distância do objeto s é positiva; caso contrario é negativa.
2. **Sinal para a distância da imagem:** Imagem do mesmo lado da luz que emerge da superfície refletora ou refratora, a distância da imagem s' é positiva; caso contrario é negativa.

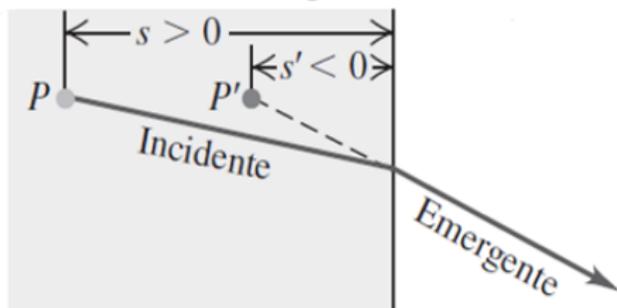
► $s = -s'$ (Espelho plano).



Regra de sinais

- Sinal para a distância do objeto:** Objeto do mesmo lado da luz que incide sobre a superfície refletora ou refratora, a distância do objeto s é positiva; caso contrario é negativa.
- Sinal para a distância da imagem:** Imagem do mesmo lado da luz que emerge da superfície refletora ou refratora, a distância da imagem s' é positiva; caso contrario é negativa.
- Sinal para o raio de curvatura de uma superfície esférica:** Centro de curvatura C do mesmo lado da luz que emerge da superfície refletora ou refratora, o raio de curvatura R é positivo; caso contrario é negativo.

Interface refratora plana.



Formação da imagem de um objeto - espelho plano

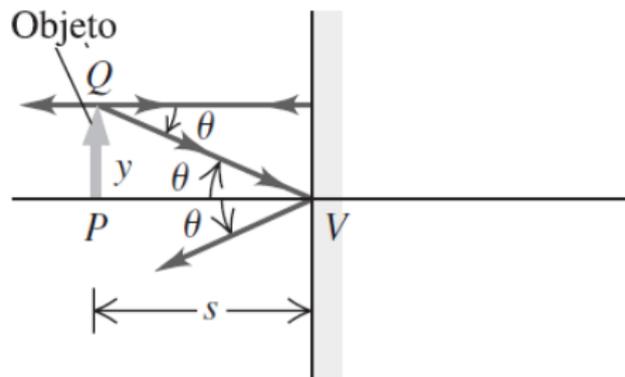
- ▶ A imagem formada por um objeto extenso é uma imagem extensa.

Formação da imagem de um objeto - espelho plano

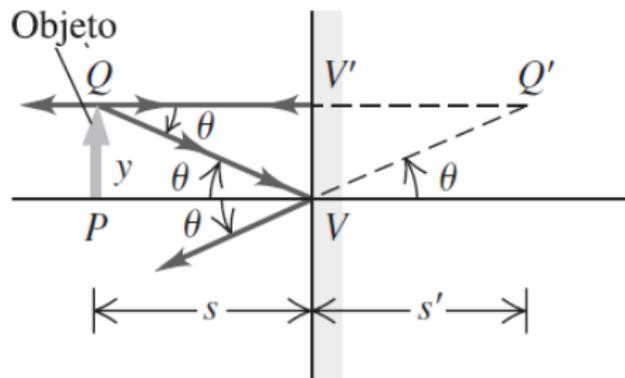
- ▶ A imagem formada por um objeto extenso é uma imagem extensa.
- ▶ Cada ponto do objeto corresponde um ponto na imagem.

Formação da imagem de um objeto - espelho plano

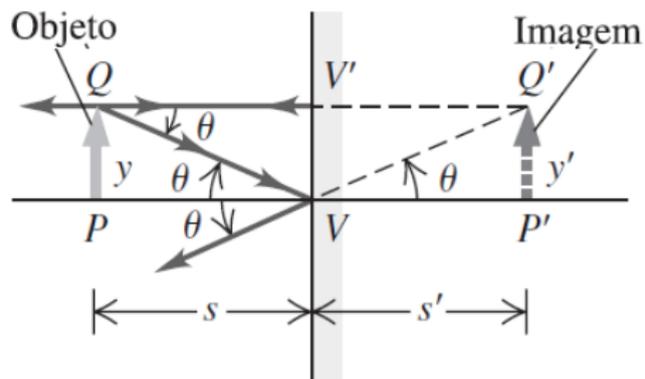
- ▶ A imagem formada por um objeto extenso é uma imagem extensa.
- ▶ Cada ponto do objeto corresponde um ponto na imagem.



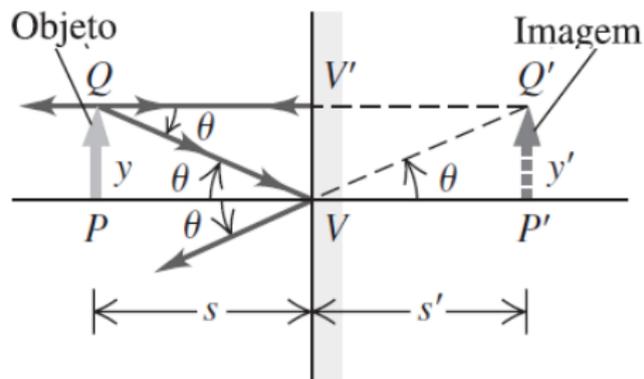
Formação da imagem de um objeto - espelho plano



Formação da imagem de um objeto - espelho plano

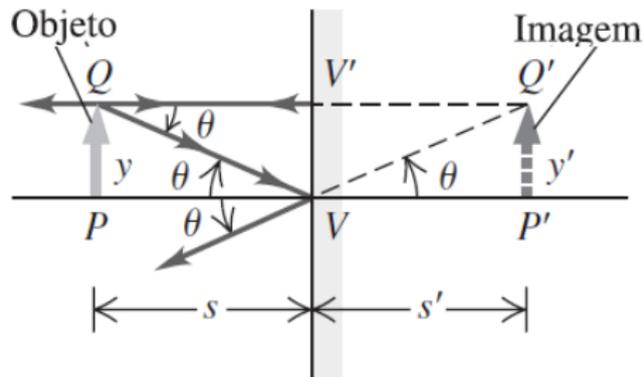


Formação da imagem de um objeto - espelho plano



- ▶ Os triângulos PQV e $P'Q'V$ são congruentes ($y = y'$).

Formação da imagem de um objeto - espelho plano



- ▶ Os triângulos PQV e $P'Q'V$ são congruentes ($y = y'$).

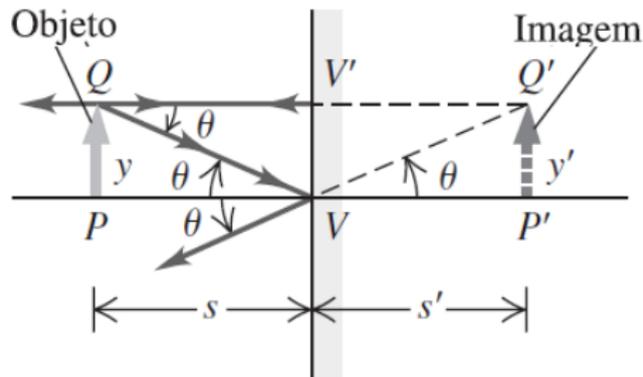
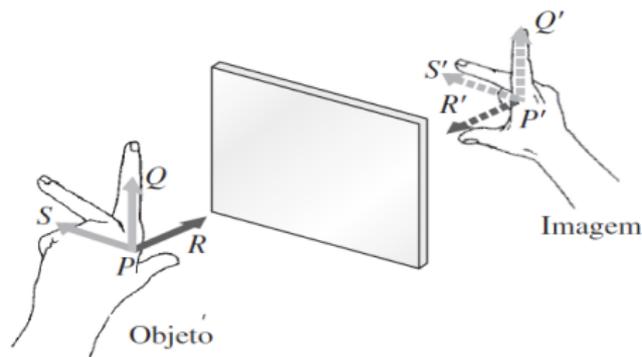
- ▶ **Ampliação transversal:**

$$m = \frac{y'}{y}$$

- ▶ **Imagem direita:** ($m > 0$)

- ▶ **Imagem invertida:** ($m < 0$)

Formação da imagem de um objeto - espelho plano



- ▶ Os triângulos PQV e $P'Q'V$ são congruentes ($y = y'$).

- ▶ **Ampliação transversal:**

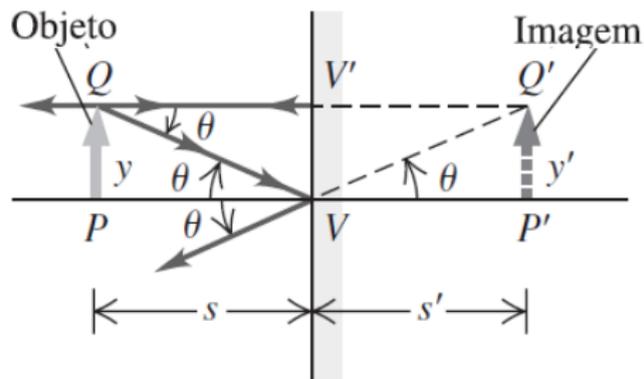
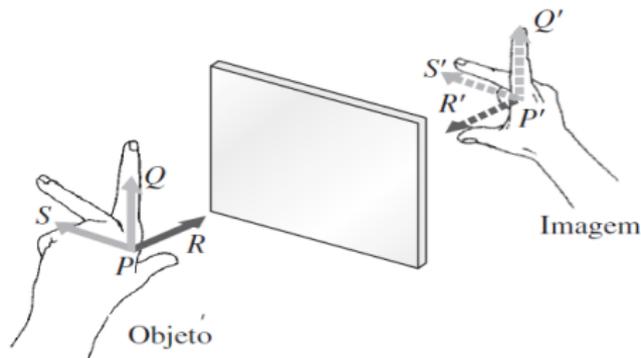
$$m = \frac{y'}{y}$$

- ▶ **Imagem direita:** ($m > 0$)

- ▶ **Imagem invertida:** ($m < 0$)

Reflexão e Refração em uma Superfície Plana

Formação da imagem de um objeto - espelho plano



- ▶ Os triângulos PQV e $P'Q'V$ são congruentes ($y = y'$).

- ▶ **Ampliação transversal:**

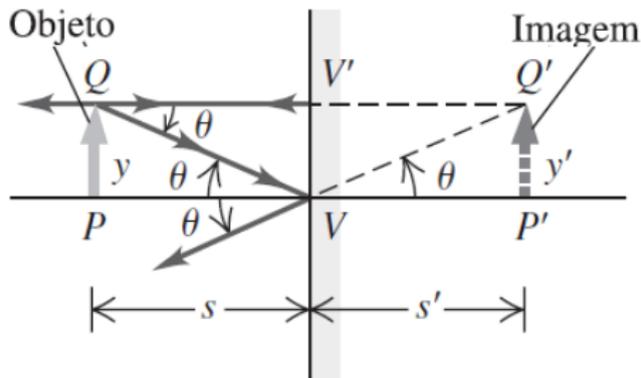
$$m = \frac{y'}{y}$$

- ▶ **Imagem direita:** ($m > 0$)
- ▶ **Imagem invertida:** ($m < 0$)

Formação da imagem de um objeto - espelho plano



- ▶ Um espelho plano forma sempre uma **imagem direita**, **porém invertida**.



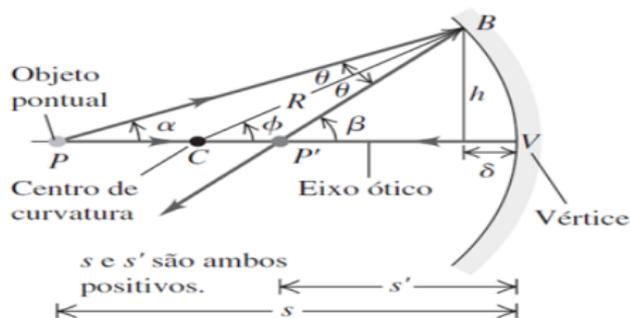
- ▶ Os triângulos PQV e $P'Q'V$ são congruentes ($y = y'$).
- ▶ **Ampliação transversal:**

$$m = \frac{y'}{y}$$

- ▶ **Imagem direita:** ($m > 0$)
- ▶ **Imagem invertida:** ($m < 0$)

Imagem de um objeto pontual - espelho esférico concavo

- ▶ O centro de curvatura da superfície é o ponto $C = R$.



Reflexão em uma Superfície Esférica

Imagem de um objeto pontual - espelho esférico concavo

- ▶ O centro de curvatura da superfície é o ponto $C = R$.
- ▶ O vértice do espelho é o ponto V .
- ▶ A linha CV denomina-se eixo óptico.
- ▶ Dos triângulos PBP' e CBP' :

$$\frac{s - R}{\sin \theta} = \frac{R}{\sin \alpha}$$

$$\frac{R - s'}{\sin \theta} = \frac{R}{\sin(\pi - \beta)}$$

$$\beta = \alpha + 2\theta$$

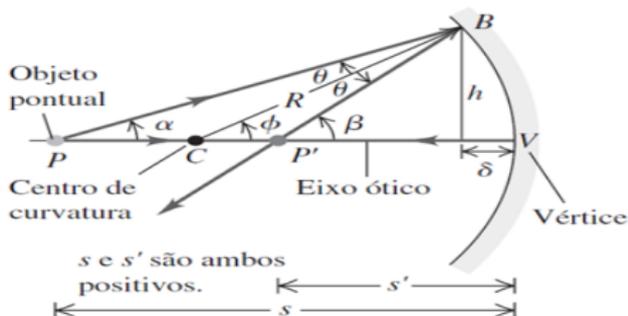


Imagem de um objeto pontual - espelho esférico concavo

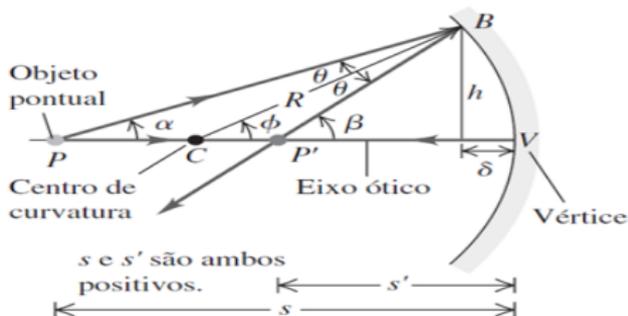
$$\frac{s - R}{\sin \theta} = \frac{R}{\sin \alpha}$$

$$\frac{R - s'}{\sin \theta} = \frac{R}{\sin(\pi - \beta)}$$

$$\beta = \alpha + 2\theta$$

▶ Para pequenos ângulos α obtemos:

$$\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = \frac{2}{R}$$



A aproximação paraxial
raios com um α pequeno.

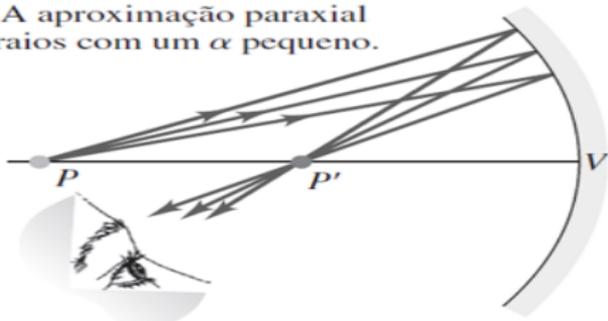


Imagem de um objeto pontual - espelho esférico concavo

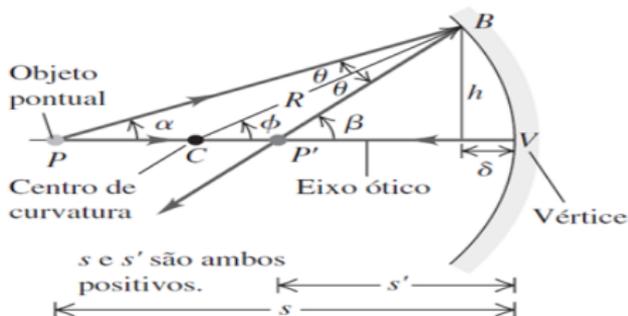
$$\frac{s - R}{\sin \theta} = \frac{R}{\sin \alpha}$$

$$\frac{R - s'}{\sin \theta} = \frac{R}{\sin(\pi - \beta)}$$

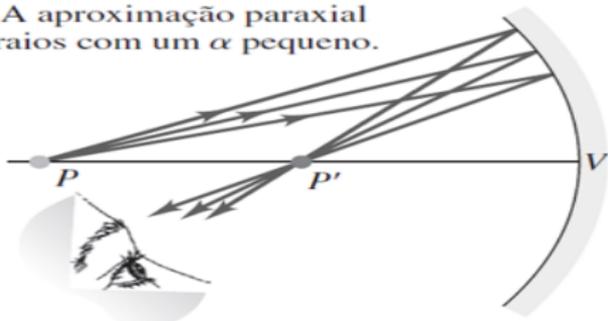
$$\beta = \alpha + 2\theta$$

▶ Para pequenos ângulos α obtemos:

$$\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = \frac{2}{R}$$



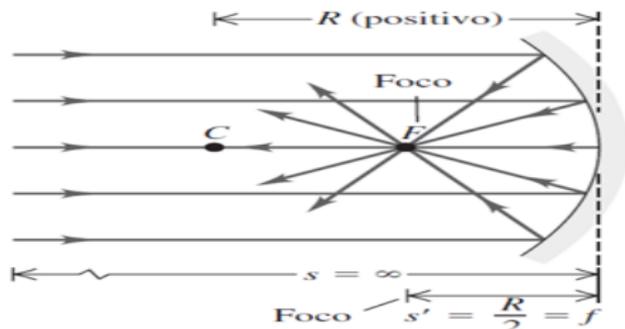
A aproximação paraxial
raios com um α pequeno.



Foco e distância focal

► Para $s \rightarrow \infty$ obtemos:

$$\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = \frac{2}{R}$$

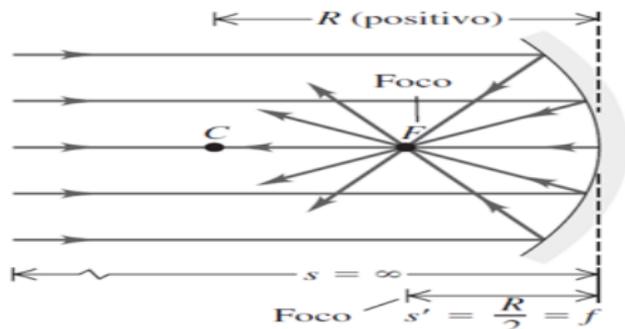


Foco e distância focal

► Para $s \rightarrow \infty$ obtemos:

$$\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = \frac{2}{R}$$

$$\frac{1}{\infty} + \frac{1}{s'} = \frac{2}{R}$$



Foco e distância focal

- ▶ Para $s \rightarrow \infty$ obtemos:

$$\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = \frac{2}{R}$$

$$\frac{1}{\infty} + \frac{1}{s'} = \frac{2}{R}$$

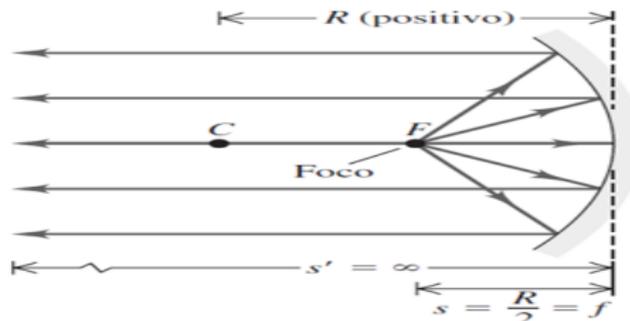
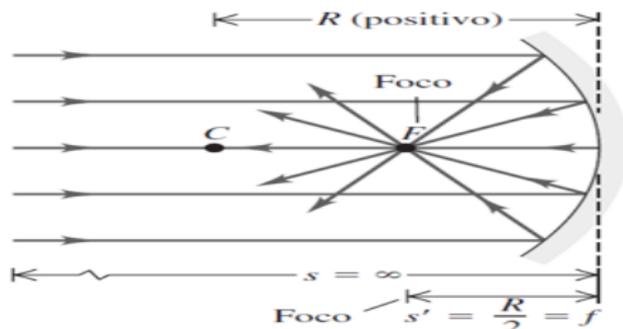
$$s' = \frac{R}{2} = f$$

- ▶ $f = R/2$ é a **distância focal**.

- ▶ Para $s = f = \frac{R}{2}$ obtemos:

$$\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = \frac{2}{R}$$

$$\frac{2}{R} + \frac{1}{s'} = \frac{2}{R}$$



Foco e distância focal

- Para $s \rightarrow \infty$ obtemos:

$$\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = \frac{2}{R}$$

$$\frac{1}{\infty} + \frac{1}{s'} = \frac{2}{R}$$

$$s' = \frac{R}{2} = f$$

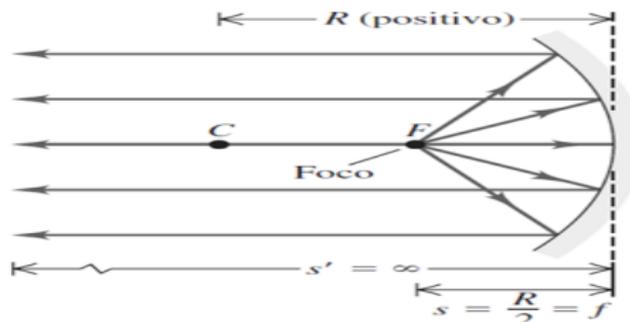
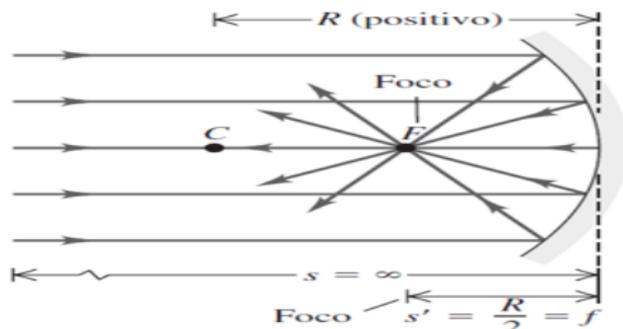
- $f = R/2$ é a **distância focal**.

- Para $s = f = \frac{R}{2}$ obtemos:

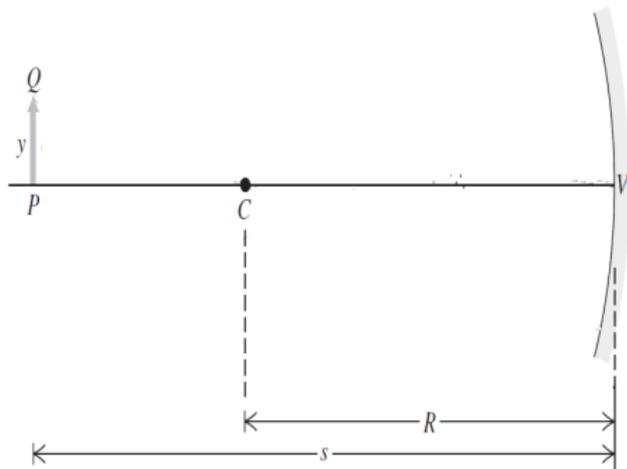
$$\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = \frac{2}{R}$$

$$\frac{2}{R} + \frac{1}{s'} = \frac{2}{R}$$

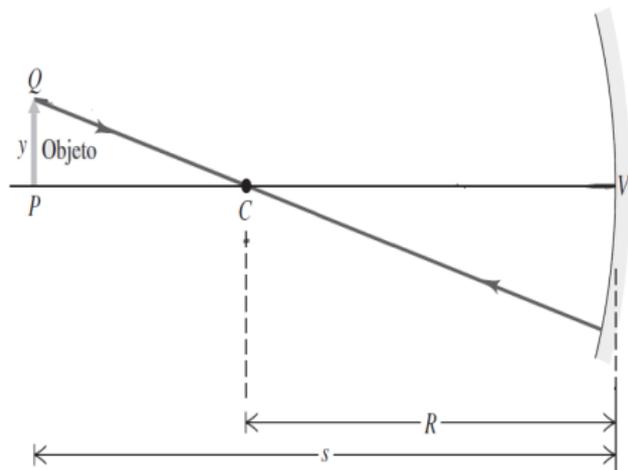
$$s' = \infty$$



Formação de imagem de um objeto extenso - espelho esférico concavo

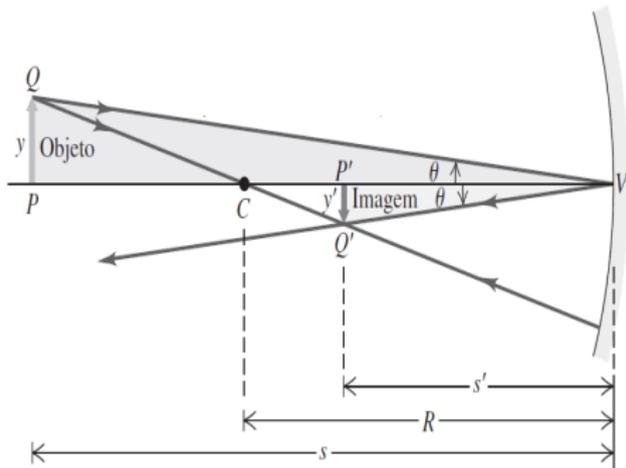


Formação de imagem de um objeto extenso - espelho esférico concavo



Formação de imagem de um objeto estenso - espelho esférico concavo

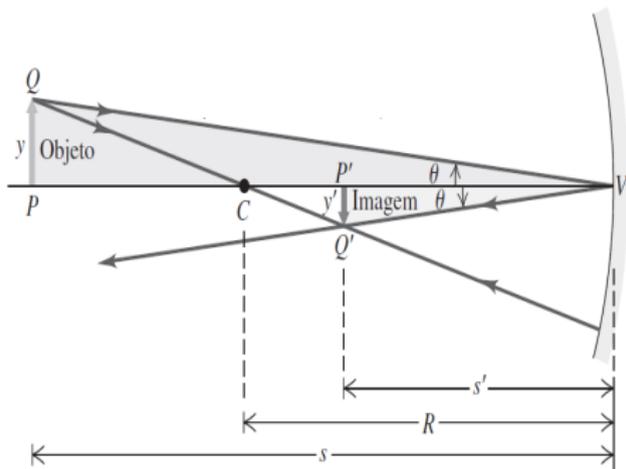
- ▶ Vemos que $y' < 0$.
- ▶ A ampliação transversal será:
 $m = -y'/y$ será obtida por:



Formação de imagem de um objeto estenso - espelho esférico concavo

- ▶ Vemos que $y' < 0$.
- ▶ A ampliação transversal será:
 $m = -y' / y$ será obtida por:

$$\frac{y'}{R - s'} = \frac{y}{s - R}$$

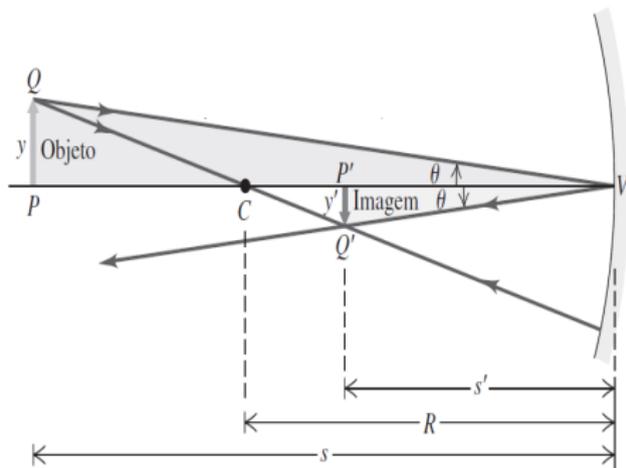


Formação de imagem de um objeto estenso - espelho esférico concavo

- ▶ Vemos que $y' < 0$.
- ▶ A ampliação transversal será:
 $m = -y'/y$ será obtida por:

$$\frac{y'}{R - s'} = \frac{y}{s - R}$$

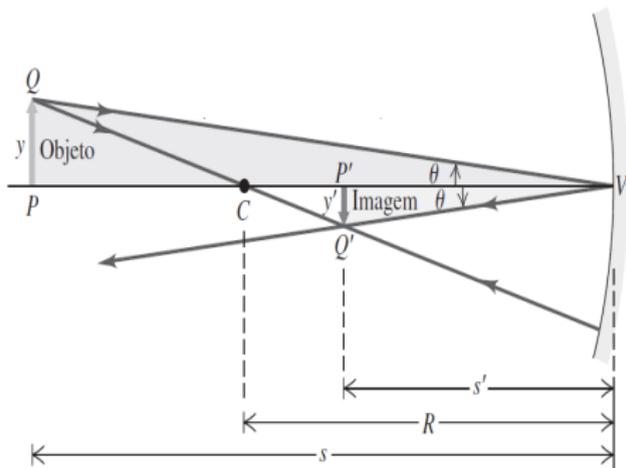
$$m = -\frac{y'}{y} = -\frac{R - s'}{s - R}$$



Formação de imagem de um objeto estenso - espelho esférico concavo

- ▶ Vemos que $y' < 0$.
- ▶ A ampliação transversal será:
 $m = -y'/y$ será obtida por:

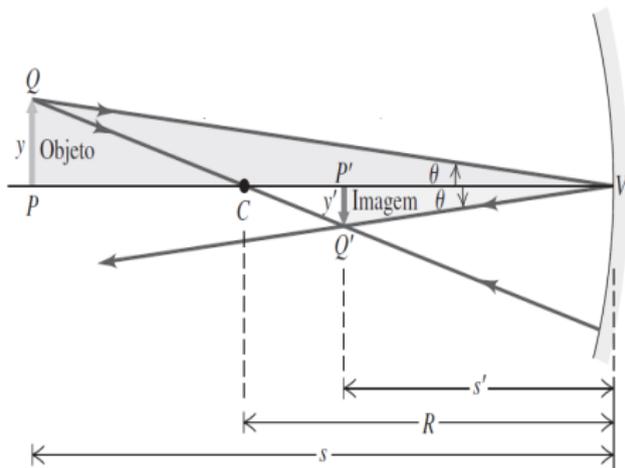
$$\begin{aligned} \frac{y'}{R - s'} &= \frac{y}{s - R} \\ m &= -\frac{y'}{y} = -\frac{R - s'}{s - R} \\ &= -\frac{s'}{s} \left[\frac{R/s' - 1}{1 - R/s} \right] \end{aligned}$$



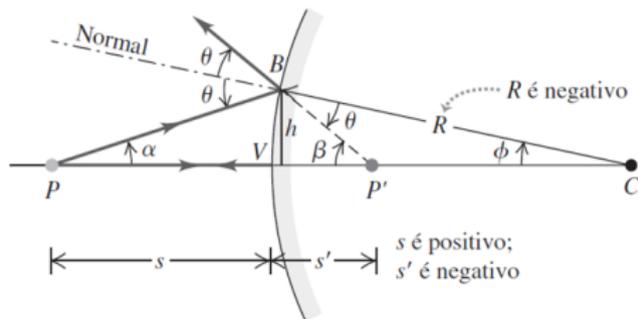
Formação de imagem de um objeto estenso - espelho esférico concavo

- ▶ Vemos que $y' < 0$.
- ▶ A ampliação transversal será:
 $m = -y'/y$ será obtida por:

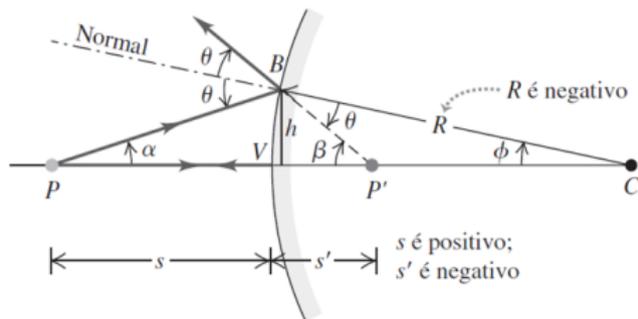
$$\begin{aligned} \frac{y'}{R - s'} &= \frac{y}{s - R} \\ m &= -\frac{y'}{y} = -\frac{R - s'}{s - R} \\ &= -\frac{s'}{s} \left[\frac{R/s' - 1}{1 - R/s} \right] \\ m &= -\frac{s'}{s} \end{aligned}$$



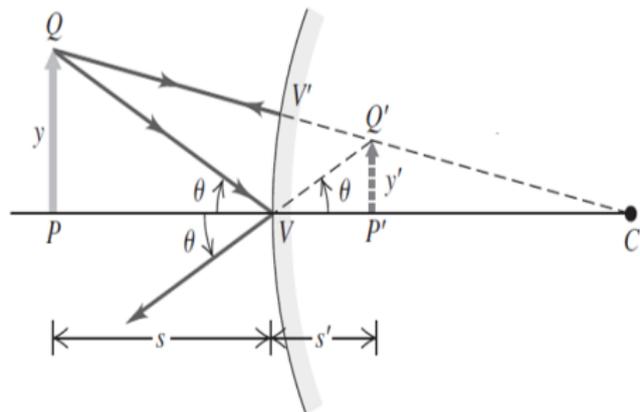
Espelho convexo



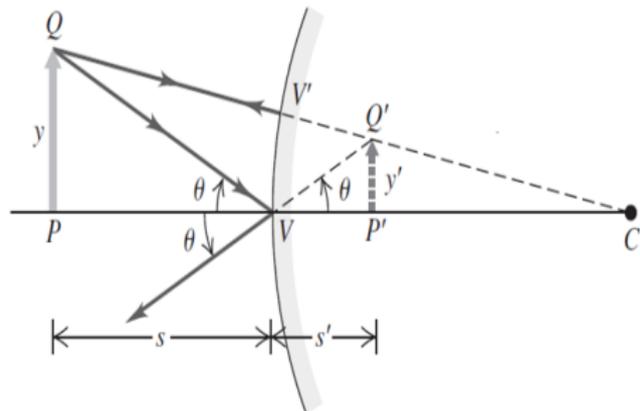
Espelho convexo



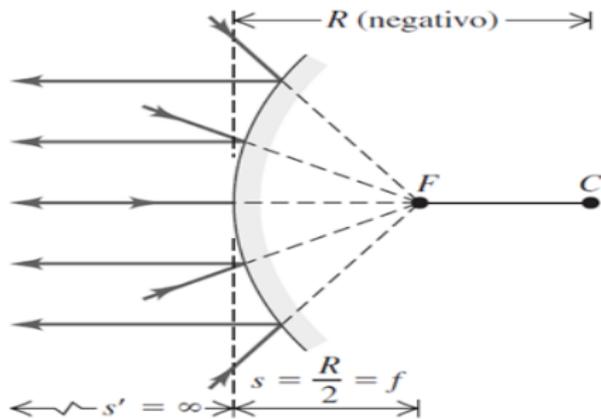
Espelho convexo



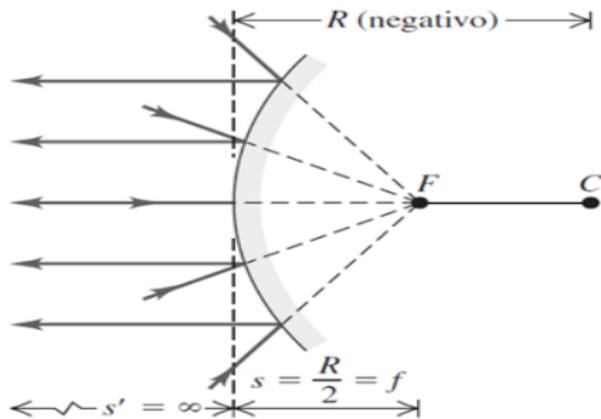
Espelho convexo



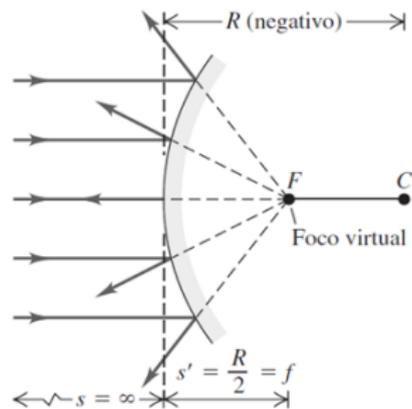
Espelho convexo



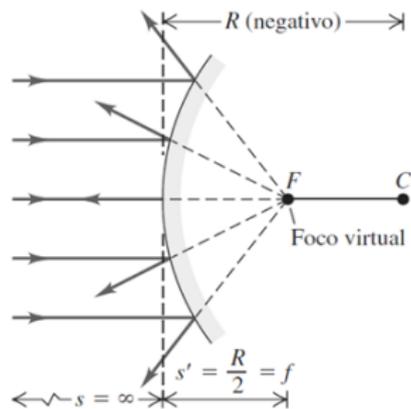
Espelho convexo



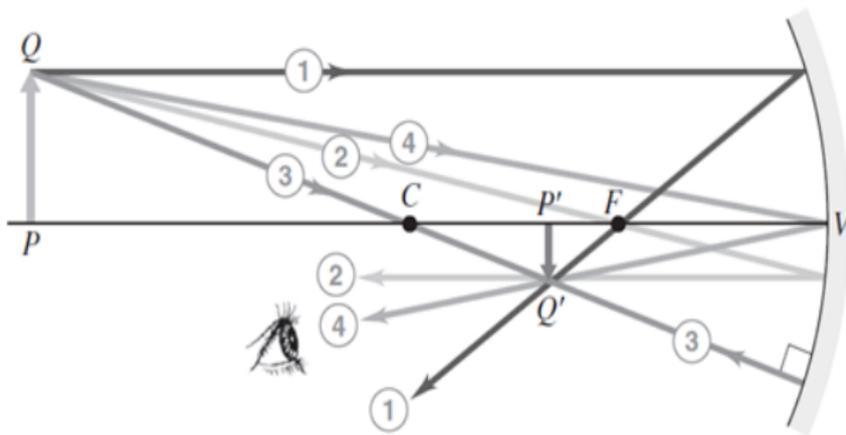
Espelho convexo



Espelho convexo

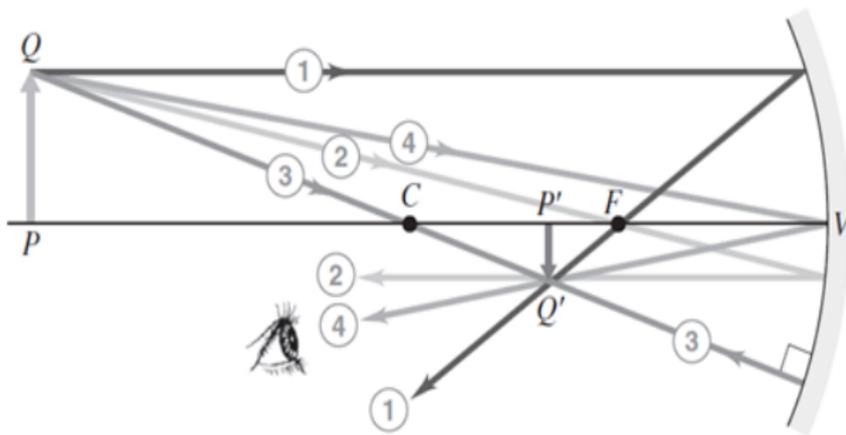


Método Gráfico para espelhos



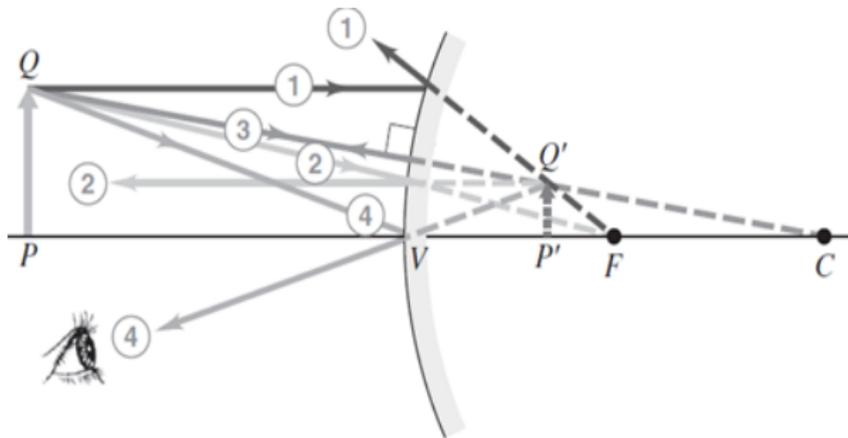
1. Raio paralelo ao eixo se reflete passando pelo foco.
2. Raio passando pelo foco se reflete paralelamente ao eixo.
3. Raio passando pelo centro de curvatura intercepta a superfície perpendicularmente e se reflete voltando pelo caminho original.
4. Raio que incide sobre o vértice se reflete simetricamente em relação ao eixo óptico.

Método Gráfico para espelhos



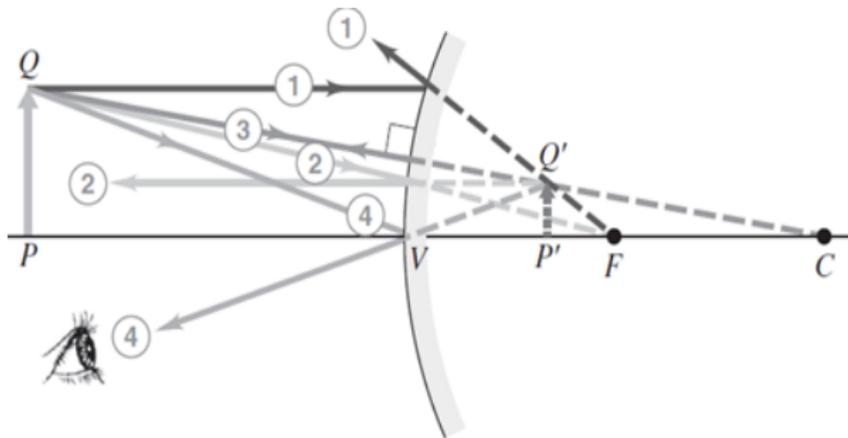
1. Raio paralelo ao eixo se reflete passando pelo foco.
2. Raio passando pelo foco se reflete paralelamente ao eixo.
3. Raio passando pelo centro de curvatura intercepta a superfície perpendicularmente e se reflete voltando pelo caminho original.
4. Raio que incide sobre o vértice se reflete simetricamente em relação ao eixo ótico.

Método Gráfico para espelhos



1. Raio paralelo refletido parece vir do foco..
2. Raio que incide sobre o foco se reflete paralelamente ao eixo.
3. Raios radiais ao centro de curvatura interceptam a superfície perpendicularmente e se refletem voltando pelo caminho original.
4. Raios que incidem sobre o vértice se refletem simetricamente em torno do eixo ótico.

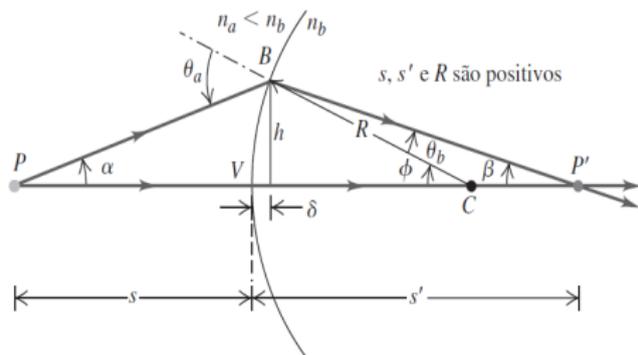
Método Gráfico para espelhos



1. Raio paralelo refletido parece vir do foco..
2. Raio que incide sobre o foco se reflete paralelamente ao eixo.
3. Raios radiais ao centro de curvatura interceptam a superfície perpendicularmente e se refletem voltando pelo caminho original.
4. Raios que incidem sobre o vértice se refletem simetricamente em torno do eixo ótico.

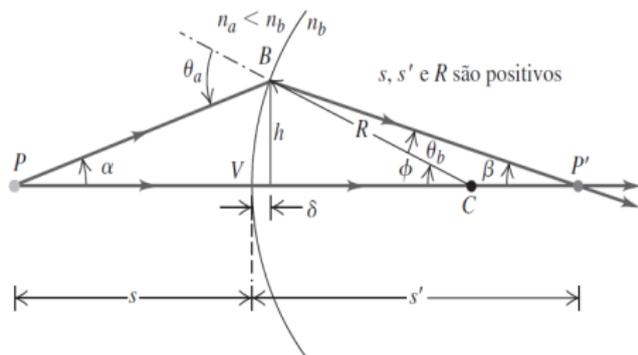
Refrção em uma Superfície Esférica

- A figura mostra, uma superfície esférica de raio R , entre dois materiais transparentes com índices de refração $n_a < n_b$.



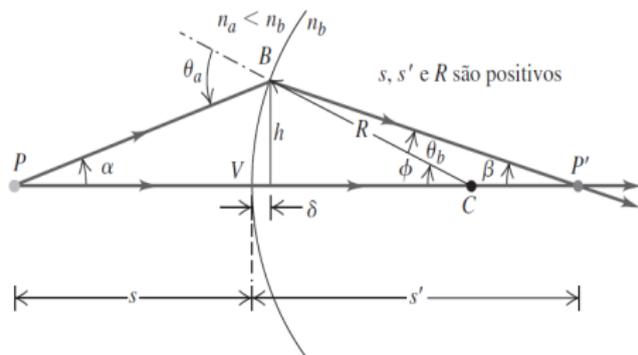
Refração em uma Superfície Esférica

- ▶ A figura mostra, uma superfície esférica de raio R , entre dois materiais transparentes com índices de refração $n_a < n_b$.
- ▶ O centro de curvatura C está do lado dos raios emergentes da superfície. ($R > 0$)
- ▶ O raio PV passa para o outro material sem sofrer nenhum desvio.



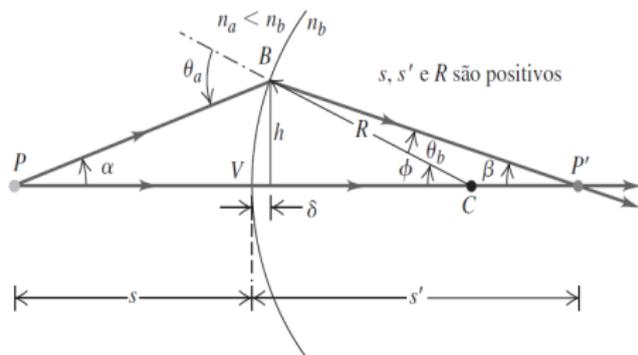
↳ Refração em uma Superfície Esférica

- ▶ A figura mostra, uma superfície esférica de raio R , entre dois materiais transparentes com índices de refração $n_a < n_b$.
- ▶ O centro de curvatura C está do lado dos raios emergentes da superfície. ($R > 0$)
- ▶ O raio PV passa para o outro material sem sofrer nenhum desvio.
- ▶ O raio PB incide formando um ângulo θ_a e o refratado ângulo θ_b .



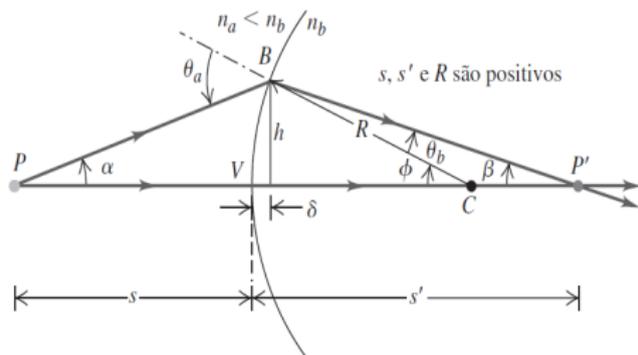
↳ Refração em uma Superfície Esférica

- ▶ A figura mostra, uma superfície esférica de raio R , entre dois materiais transparentes com índices de refração $n_a < n_b$.
- ▶ O centro de curvatura C está do lado dos raios emergentes da superfície. ($R > 0$)
- ▶ O raio PV passa para o outro material sem sofrer nenhum desvio.
- ▶ O raio PB incide formando um ângulo θ_a e o refratado ângulo θ_b .
- ▶ Os raios emergentes se cruzam no ponto P' , a uma distancia s' do lado direito do vértice.



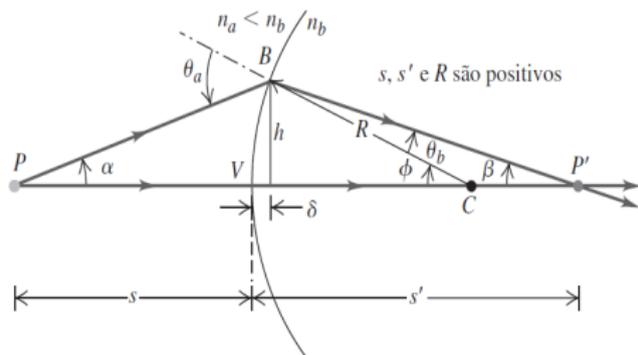
Refração em uma Superfície Esférica

- ▶ A figura mostra, uma superfície esférica de raio R , entre dois materiais transparentes com índices de refração $n_a < n_b$.
- ▶ O centro de curvatura C está do lado dos raios emergentes da superfície. ($R > 0$)
- ▶ O raio PV passa para o outro material sem sofrer nenhum desvio.
- ▶ O raio PB incide formando um ângulo θ_a e o refratado ângulo θ_b .
- ▶ Os raios emergentes se cruzam no ponto P' , a uma distancia s' do lado direito do vértice.
- ▶ As distancias do objeto e da imagem são ambas positivas.



↳ Refração em uma Superfície Esférica

- ▶ A figura mostra, uma superfície esférica de raio R , entre dois materiais transparentes com índices de refração $n_a < n_b$.
- ▶ O centro de curvatura C está do lado dos raios emergentes da superfície. ($R > 0$)
- ▶ O raio PV passa para o outro material sem sofrer nenhum desvio.
- ▶ O raio PB incide formando um ângulo θ_a e o refratado ângulo θ_b .
- ▶ Os raios emergentes se cruzam no ponto P' , a uma distancia s' do lado direito do vértice.
- ▶ As distancias do objeto e da imagem são ambas positivas.
- ▶ Se $\alpha \ll 1$ todos os raios de P se interceptam em P' .
- ▶ O ponto P' é a imagem real de P .

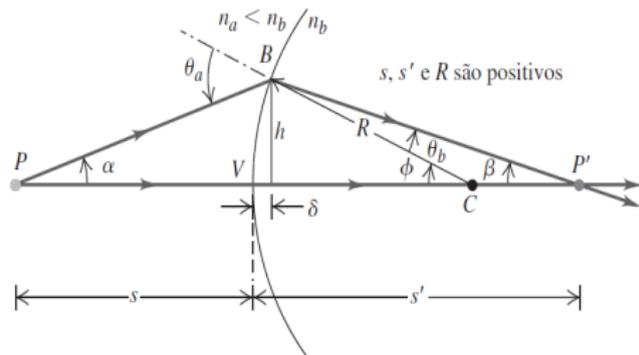


- Dos triângulos PBC e CBP' :

$$\frac{R}{\sin \alpha} = \frac{s + R}{\sin \theta_a}$$

$$\frac{R}{\sin \beta} = \frac{s' - R}{\sin \theta_b}$$

$$n_a \sin \theta_a = n_b \sin \theta_b$$



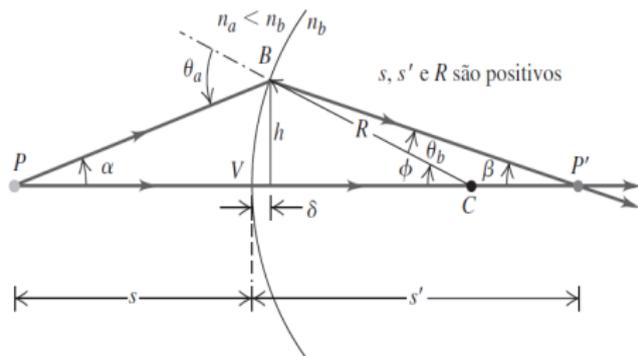
► Dos triângulos PBC e CBP' :

$$\frac{R}{\sin \alpha} = \frac{s + R}{\sin \theta_a}$$

$$\frac{R}{\sin \beta} = \frac{s' - R}{\sin \theta_b}$$

$$n_a \sin \theta_a = n_b \sin \theta_b$$

$$\frac{s' - R}{s + R} = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} \frac{n_a}{n_b}$$



- Dos triângulos PBC e CBP' :

$$\frac{R}{\sin \alpha} = \frac{s + R}{\sin \theta_a}$$

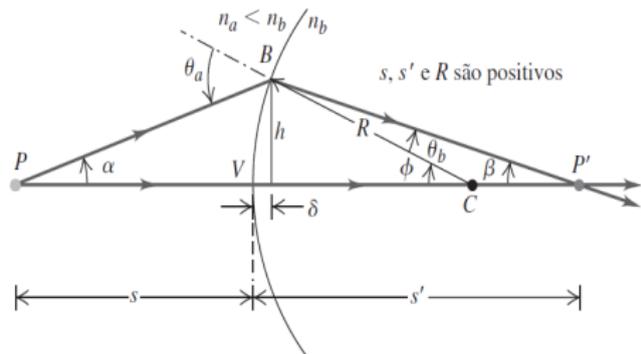
$$\frac{R}{\sin \beta} = \frac{s' - R}{\sin \theta_b}$$

$$n_a \sin \theta_a = n_b \sin \theta_b$$

$$\frac{s' - R}{s + R} = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} \frac{n_a}{n_b}$$

- Para $\alpha < 1.0 \text{ rad}$ obtemos:

$$\frac{n_a}{s} + \frac{n_b}{s'} = \frac{n_b - n_a}{R}$$

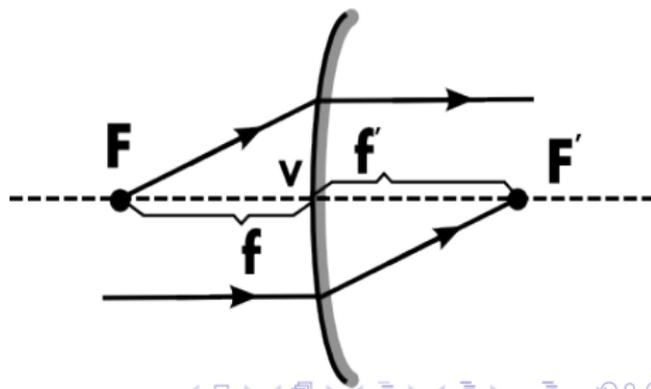
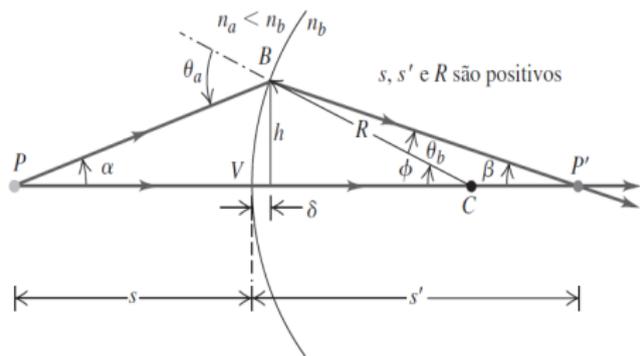


Refrção em uma Superfície Esfrica

$$\frac{n_a}{s} + \frac{n_b}{s'} = \frac{n_b - n_a}{R}$$

- Um raio incidente paralelo ao eixo $s \rightarrow \infty$ obtemos um **foco imagem** F' , com $s' = f'$.

$$\frac{n_b}{f'} = \frac{n_b - n_a}{R}$$



Refrão em uma Superfície Esférica

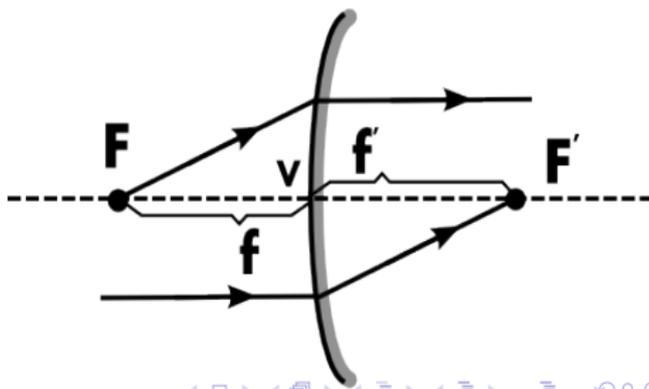
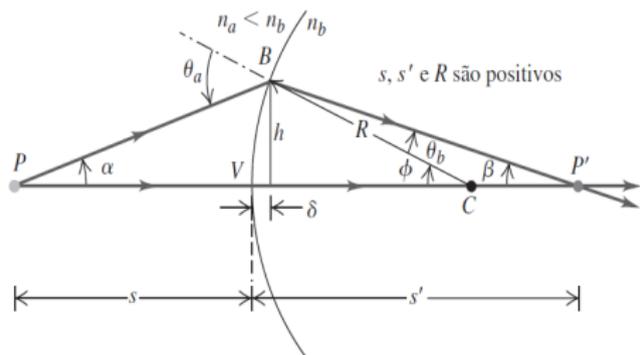
$$\frac{n_a}{s} + \frac{n_b}{s'} = \frac{n_b - n_a}{R}$$

- Um raio incidente paralelo ao eixo $s \rightarrow \infty$ obtemos um **foco imagem** F' , com $s' = f'$.

$$\frac{n_b}{f'} = \frac{n_b - n_a}{R}$$

- A imagem se forma no infinito para $s' \rightarrow \infty$ quando o objeto está no **foco objeto** F , com $s = f$.

$$\frac{n_a}{f} = \frac{n_b - n_a}{R}$$



Refrão em uma Superfície Esférica

$$\frac{n_a}{s} + \frac{n_b}{s'} = \frac{n_b - n_a}{R}$$

- Um raio incidente paralelo ao eixo $s \rightarrow \infty$ obtemos um **foco imagem** F' , com $s' = f'$.

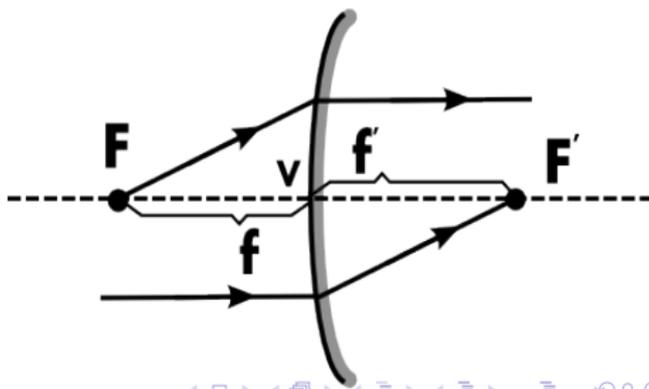
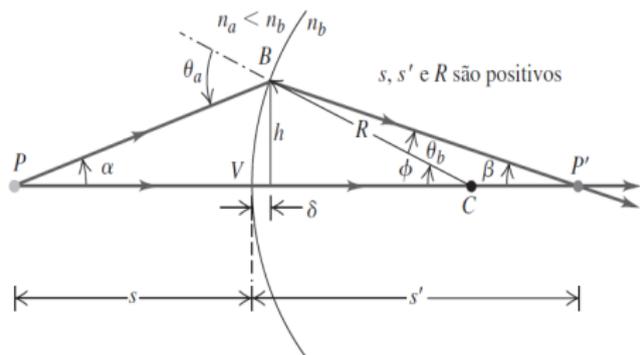
$$\frac{n_b}{f'} = \frac{n_b - n_a}{R}$$

- A imagem se forma no infinito para $s' \rightarrow \infty$ quando o objeto está no **foco objeto** F , com $s = f$.

$$\frac{n_a}{f} = \frac{n_b - n_a}{R}$$

- Logo temos duas distâncias focais distintas, com

$$\frac{n_a}{s} + \frac{n_b}{s'} = \frac{n_b - n_a}{R} = \frac{n_a}{f} = \frac{n_b}{f'}$$

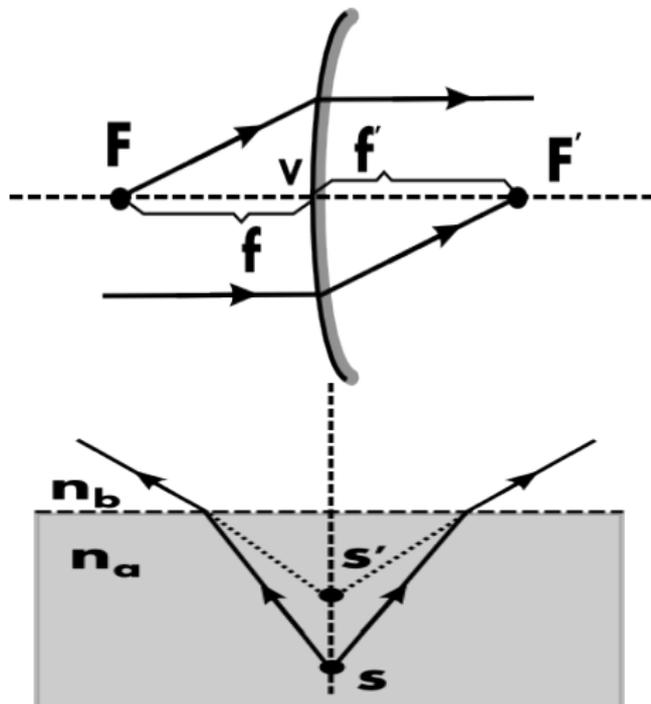


Refrção em uma Superfície Esfrica

$$\frac{n_a}{s} + \frac{n_b}{s'} = \frac{n_b - n_a}{R} = \frac{n_a}{f} = \frac{n_b}{f'}$$

- Um limite interessante é o de uma interface plana. ($R \rightarrow \infty$)

$$s' = -\frac{n_b}{n_a}s$$



Refrção em uma Superfície Esférica

$$\frac{n_a}{s} + \frac{n_b}{s'} = \frac{n_b - n_a}{R} = \frac{n_a}{f} = \frac{n_b}{f'}$$

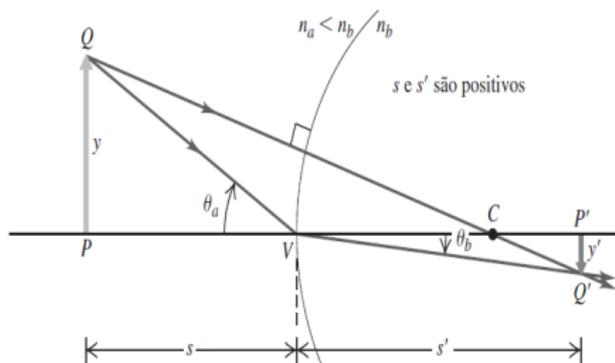
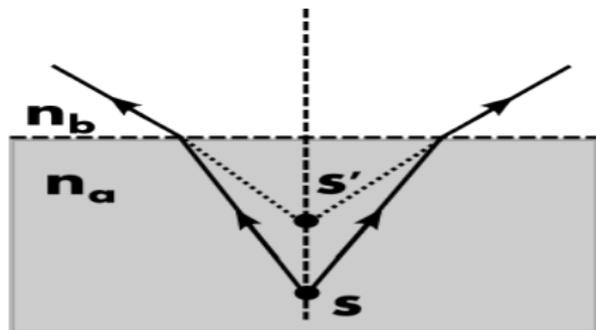
- Um limite interessante é o de uma interface plana. ($R \rightarrow \infty$)

$$s' = -\frac{n_b}{n_a}s$$

- A ampliação lateral é obtida por:

$$\tan \theta_a = \frac{y}{s}$$

$$\tan \theta_b = \frac{-y'}{s'}$$



Refrção em uma Superfície Esférica

$$\frac{n_a}{s} + \frac{n_b}{s'} = \frac{n_b - n_a}{R} = \frac{n_a}{f} = \frac{n_b}{f'}$$

- Um limite interessante é o de uma interface plana. ($R \rightarrow \infty$)

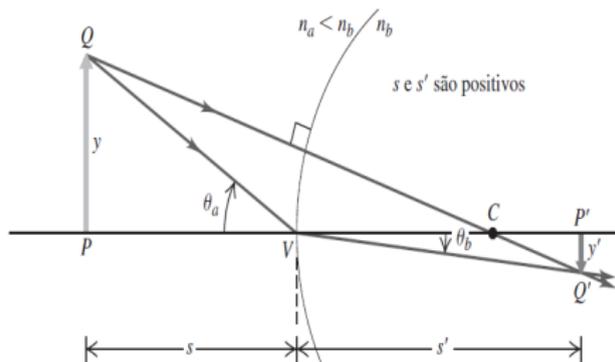
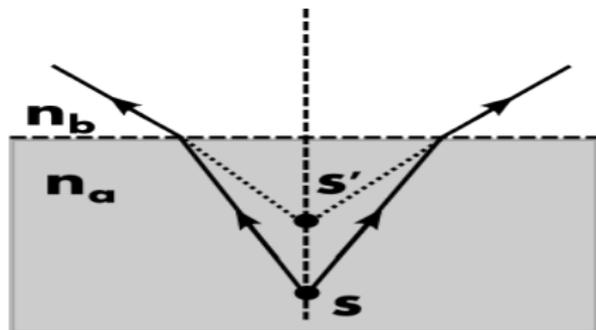
$$s' = -\frac{n_b}{n_a}s$$

- A ampliação lateral é obtida por:

$$\tan \theta_a = \frac{y}{s}$$

$$\tan \theta_b = \frac{-y'}{s'}$$

$$m = \frac{y'}{y} = -\frac{s' \tan \theta_b}{s \tan \theta_a}$$



↳ Refração em uma Superfície Esférica

$$\frac{n_a}{s} + \frac{n_b}{s'} = \frac{n_b - n_a}{R} = \frac{n_a}{f} = \frac{n_b}{f'}$$

- ▶ Um limite interessante é o de uma interface plana. ($R \rightarrow \infty$)

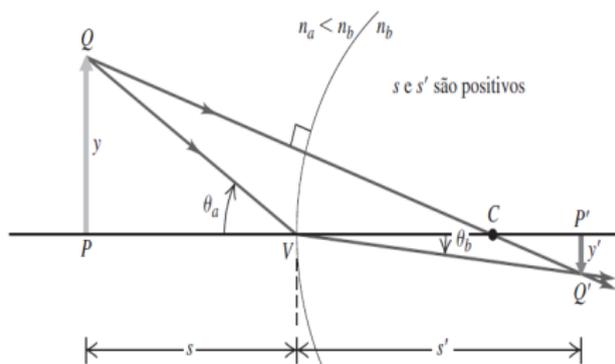
$$s' = -\frac{n_b}{n_a} s$$

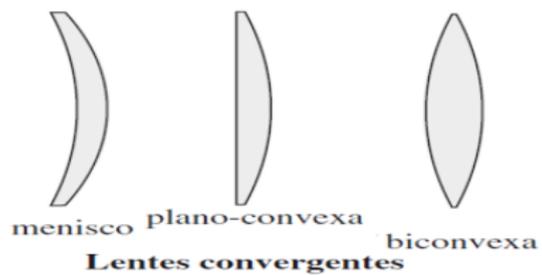
- ▶ A ampliação lateral é obtida por:

$$\tan \theta_a = \frac{y}{s}$$

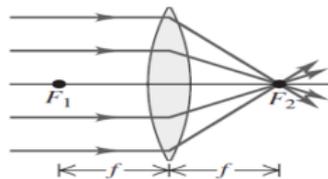
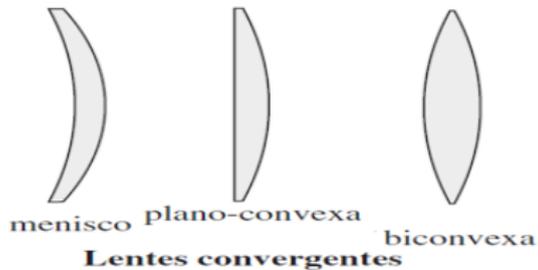
$$\tan \theta_b = \frac{-y'}{s'}$$

$$m = \frac{y'}{y} = -\frac{s'}{s} \frac{n_a}{n_b}$$





Lentes Delgadas



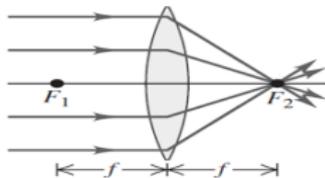
Distância focal

- Medida a partir do centro da lente
- Sempre a mesma de ambos os lados da lente
- Positiva para uma lente delgada convergente

Lentes Delgadas



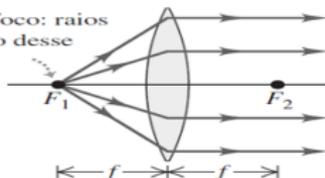
menisco plano-convexa biconvexa
Lentes convergentes



Distância focal

- Medida a partir do centro da lente
- Sempre a mesma de ambos os lados da lente
- Positiva para uma lente delgada convergente

Primeiro foco: raios divergindo desse ponto emergem da lente paralelos ao eixo



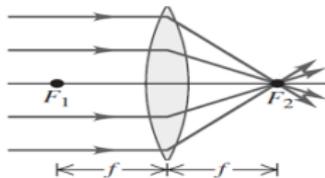
└ Lentes Delgadas



menisco plano-convexa biconvexa
Lentes convergentes

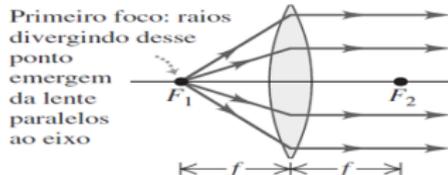


menisco plano-côncava bicôncava
Lentes divergentes



Distância focal

- Medida a partir do centro da lente
- Sempre a mesma de ambos os lados da lente
- Positiva para uma lente delgada convergente

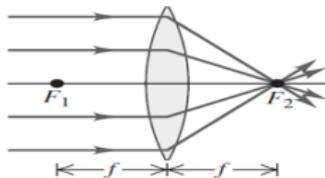


Primeiro foco: raios divergindo desse ponto emergem da lente paralelos ao eixo

Lentes Delgadas



menisco plano-convexa biconvexa
Lentes convergentes

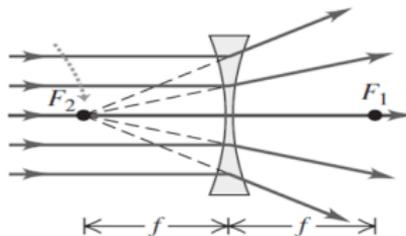


Distância focal

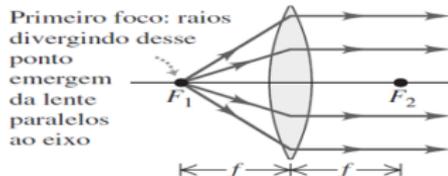
- Medida a partir do centro da lente
- Sempre a mesma de ambos os lados da lente
- Positiva para uma lente delgada convergente



menisco plano-côncava bicôncava
Lentes divergentes



Em uma lente delgada divergente f é negativo

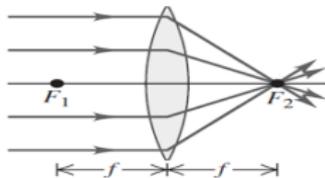


Primeiro foco: raios divergindo desse ponto emergem da lente paralelos ao eixo

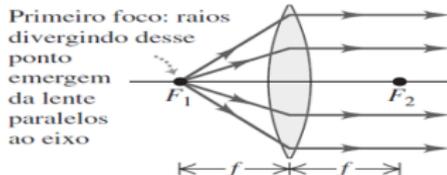
Lentes Delgadas



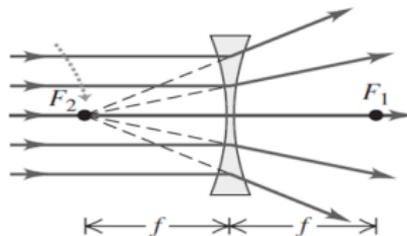
menisco plano-convexa biconvexa
Lentes convergentes



- Distância focal
- Medida a partir do centro da lente
 - Sempre a mesma de ambos os lados da lente
 - Positiva para uma lente delgada convergente



menisco plano-côncava bicôncava
Lentes divergentes



Em uma lente delgada divergente f é negativo

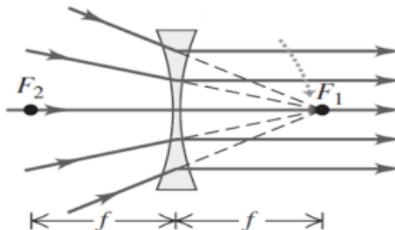


Imagem de um objeto extenso

- ▶ A imagem é obtida por:

$$\frac{y}{s} = \frac{-y'}{s'}$$

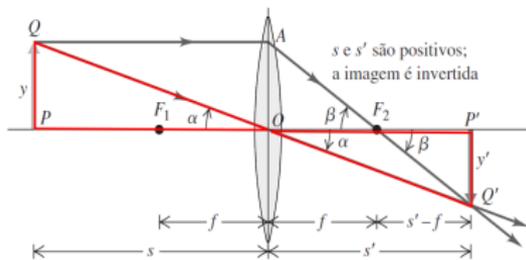


Imagem de um objeto extenso

► A imagem é obtida por:

$$\frac{y}{s} = \frac{-y'}{s'}$$

$$\frac{y'}{y} = \frac{-s'}{s}$$

$$\frac{y}{f} = -\frac{y'}{s' - f}$$

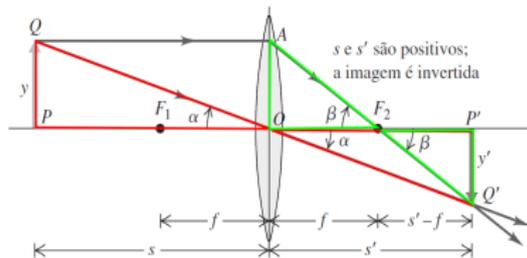


Imagem de um objeto extenso

- A imagem é obtida por:

$$\frac{y}{s} = \frac{-y'}{s'}$$

$$\frac{y'}{y} = \frac{-s'}{s}$$

$$\frac{y}{f} = -\frac{y'}{s' - f}$$

$$\frac{y'}{y} = -\frac{s' - f}{f}$$

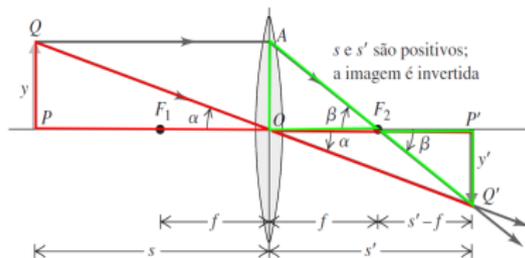


Imagem de um objeto extenso

- A imagem é obtida por:

$$\frac{y}{s} = \frac{-y'}{s'}$$

$$\frac{y'}{y} = \frac{-s'}{s}$$

$$\frac{y}{f} = -\frac{y'}{s' - f}$$

$$\frac{y'}{y} = -\frac{s' - f}{f}$$

$$\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = \frac{1}{f}$$

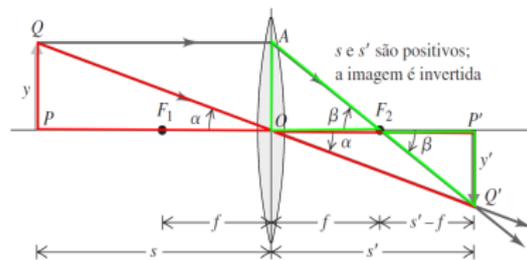


Imagem de um objeto extenso

- ▶ A imagem é obtida por:

$$\frac{y}{s} = \frac{-y'}{s'}$$

$$\frac{y'}{y} = \frac{-s'}{s}$$

$$\frac{y}{f} = -\frac{y'}{s' - f}$$

$$\frac{y'}{y} = -\frac{s' - f}{f}$$

$$\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = \frac{1}{f}$$

- ▶ A ampliação lateral é obtida por:

$$m = -\frac{s'}{s}$$

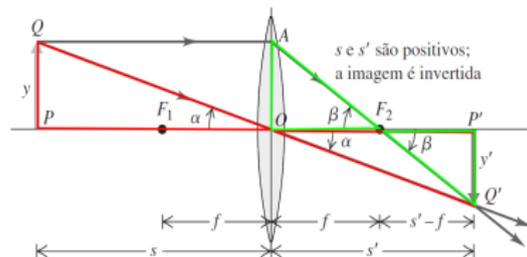


Imagem de um objeto extenso

- ▶ A imagem é obtida por:

$$\frac{y}{s} = -\frac{y'}{s'}$$

$$\frac{y'}{y} = -\frac{s'}{s}$$

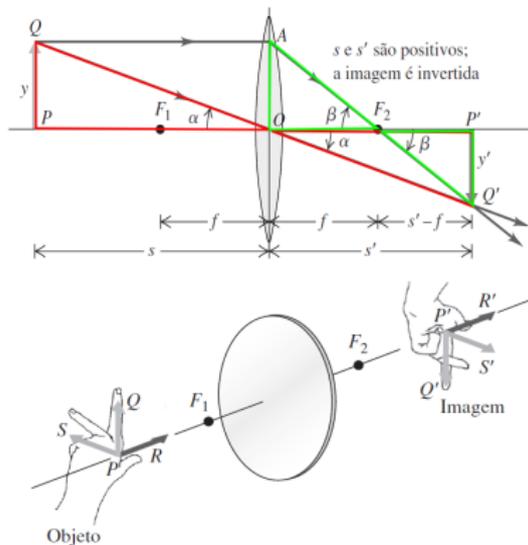
$$\frac{y}{f} = -\frac{y'}{s' - f}$$

$$\frac{y'}{y} = -\frac{s' - f}{f}$$

$$\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = \frac{1}{f}$$

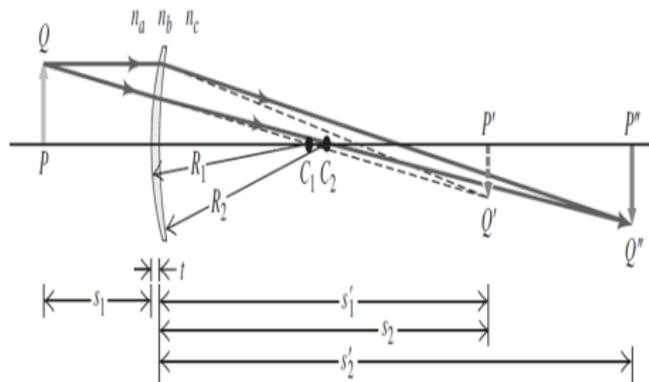
- ▶ A ampliação lateral é obtida por:

$$m = -\frac{s'}{s}$$



A equação do fabricante de lentes

- ▶ A imagem da lente R_1 forma uma imagem para lente R_2 assim:

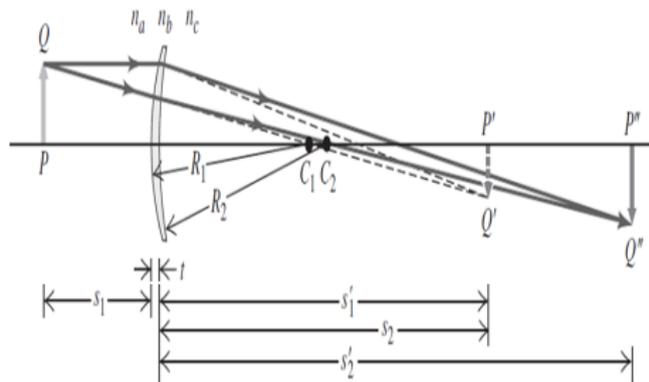


A equação do fabricante de lentes

- A imagem da lente R_1 forma uma imagem para lente R_2 assim:

$$\frac{n_a}{s_1} + \frac{n_b}{s_1'} = \frac{n_b - n_a}{R_1}$$

$$\frac{n_b}{s_2} + \frac{n_c}{s_2'} = \frac{n_c - n_b}{R_2}$$



A equação do fabricante de lentes

- ▶ A imagem da lente R_1 forma uma imagem para lente R_2 assim:

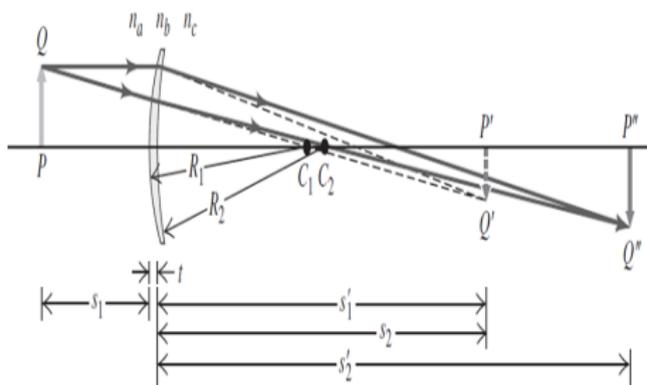
$$\frac{n_a}{s_1} + \frac{n_b}{s_1'} = \frac{n_b - n_a}{R_1}$$

$$\frac{n_b}{s_2} + \frac{n_c}{s_2'} = \frac{n_c - n_b}{R_2}$$

- ▶ Como $n_c = n_a = 1$ (ar, vácuo), $n_b = n$ e $s_2 = -s_1'$,

$$\frac{1}{s_1} + \frac{n}{s_1'} = \frac{n - 1}{R_1}$$

$$-\frac{n}{s_1'} + \frac{1}{s_2'} = \frac{1 - n}{R_2}$$



A equação do fabricante de lentes

- ▶ A imagem da lente R_1 forma uma imagem para lente R_2 assim:

$$\frac{n_a}{s_1} + \frac{n_b}{s_1'} = \frac{n_b - n_a}{R_1}$$

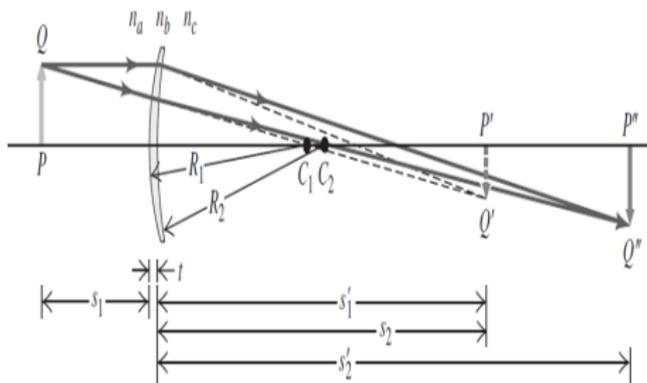
$$\frac{n_b}{s_2} + \frac{n_c}{s_2'} = \frac{n_c - n_b}{R_2}$$

- ▶ Como $n_c = n_a = 1$ (ar, vácuo), $n_b = n$ e $s_2 = -s_1'$,

$$\frac{1}{s_1} + \frac{n}{s_1'} = \frac{n - 1}{R_1}$$

$$-\frac{n}{s_1'} + \frac{1}{s_2} = \frac{1 - n}{R_2}$$

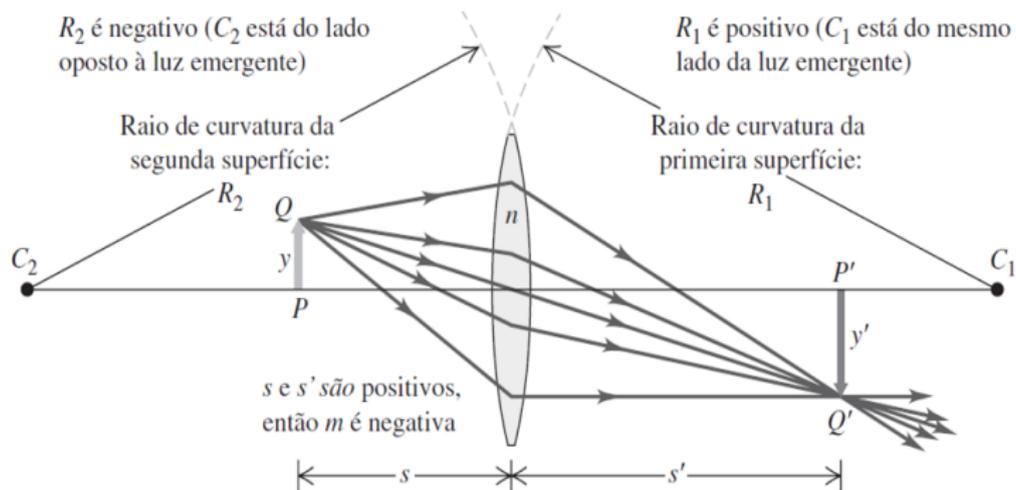
$$\frac{1}{s_1} + \frac{1}{s_2} = (n - 1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right)$$



A equação do fabricante de lentes

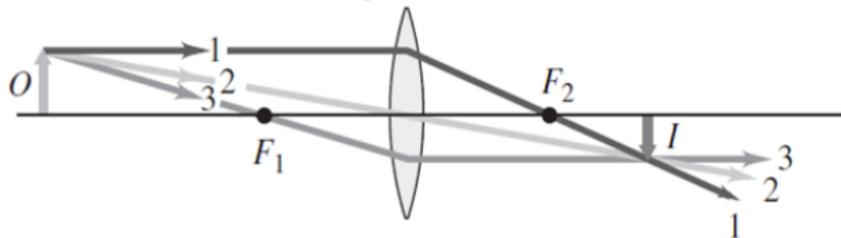
- ▶ A imagem da lente R_1 forma uma imagem para lente R_2 assim:

$$\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = (n - 1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) = \frac{1}{f}$$



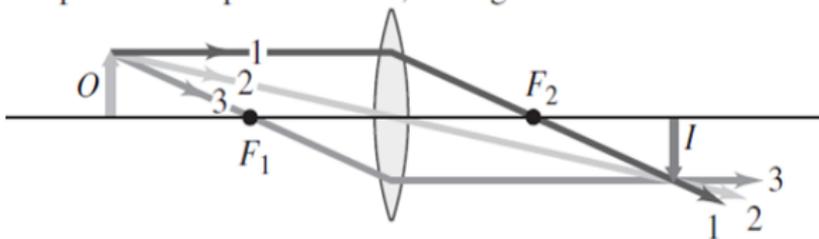
Método Gráfico para Lentes

O objeto O está fora da região entre o foco e o vértice; a imagem I é real.



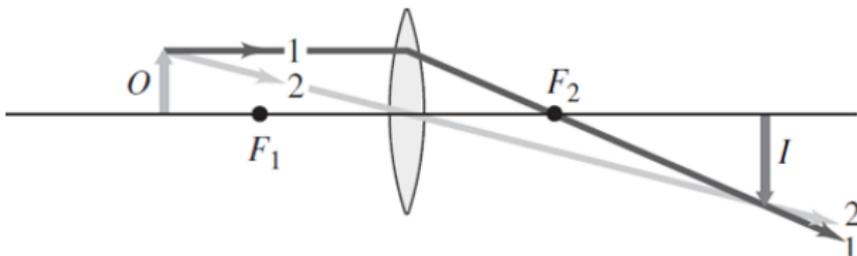
Método Gráfico para Lentes

- (b) O objeto O ainda está fora da região entre o foco e o vértice, porém mais perto do foco; a imagem I é real e mais afastada.



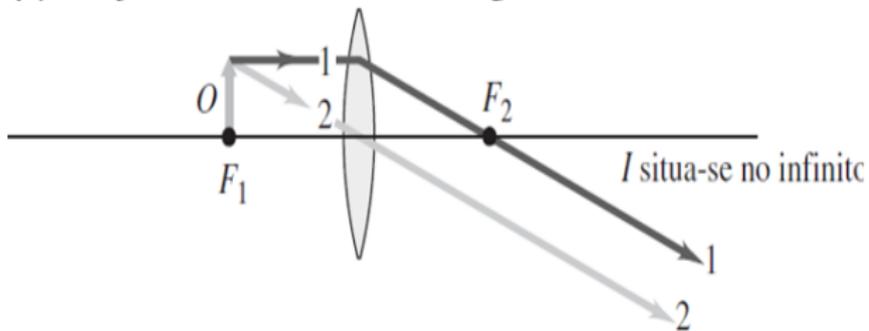
Método Gráfico para Lentes

- (c) O objeto O continua fora da região entre o foco e o vértice, porém está ainda mais perto do foco; a imagem I é real e ainda mais afastada.



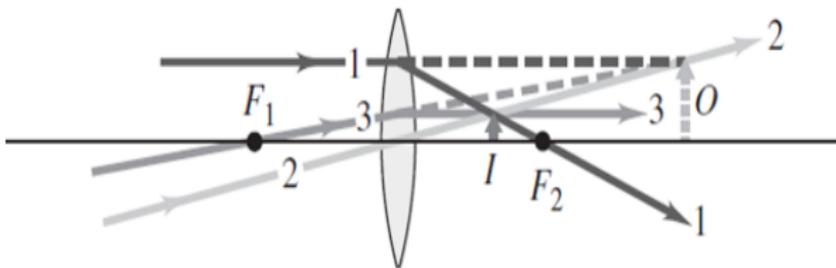
Método Gráfico para Lentes

(d) O objeto O está sobre o foco; a imagem I situa-se no infinito.



Método Gráfico para Lentes

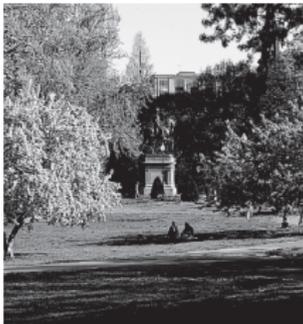
(f) Um objeto virtual O (os raios de luz estão *convergindo* para a lente).



(a) $f = 28 \text{ mm}$



(b) $f = 105 \text{ mm}$



(c) $f = 300 \text{ mm}$

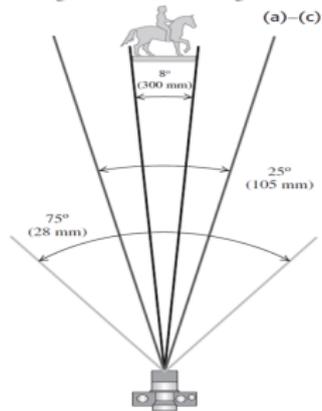


$$\text{numero } f = \frac{f}{D}$$

$$f = \text{numero } f \cdot D$$

$$D = \frac{f}{\text{numero } f}$$

Os ângulos de visão das fotografias



(a) $f = 28 \text{ mm}$



(b) $f = 105 \text{ mm}$

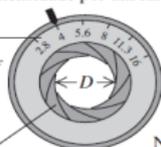


(c) $f = 300 \text{ mm}$



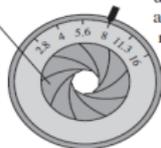
Alterar o diâmetro por um fator de $\sqrt{2}$ altera a intensidade por um fator de 2

Escala do número f



Abertura $f/4$

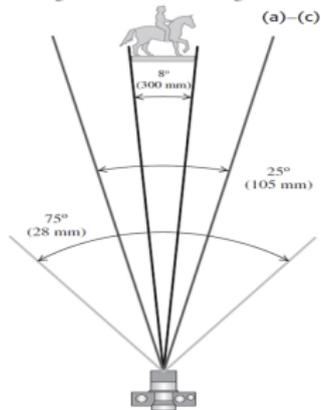
Diafragma ajustável

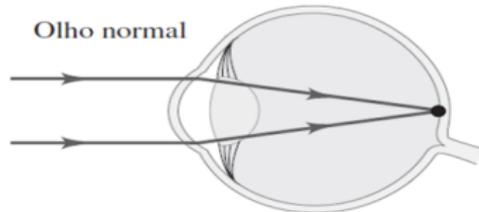


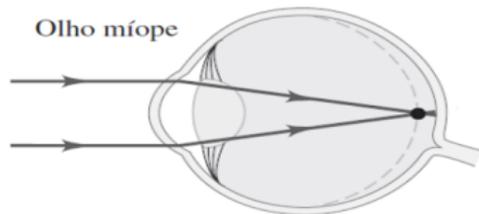
Abertura $f/8$

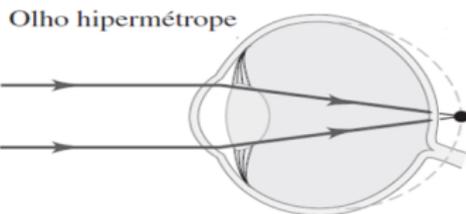
Números f maiores significam uma abertura menor

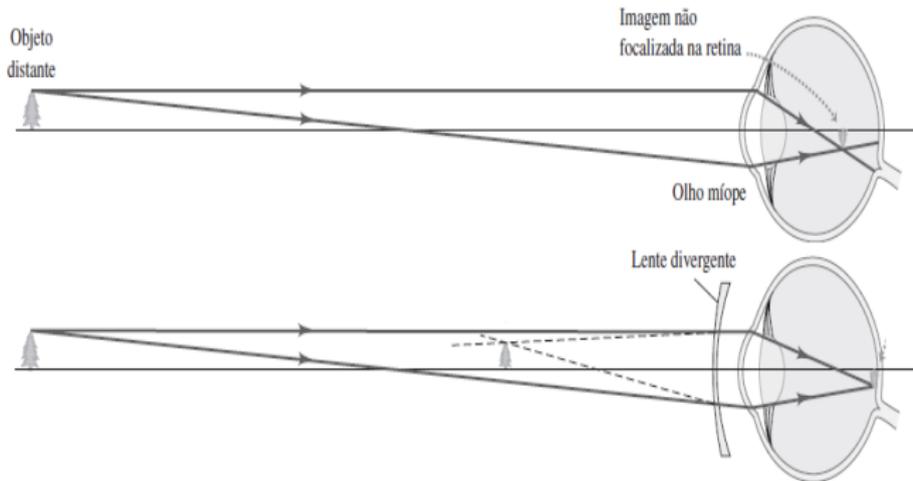
Os ângulos de visão das fotografias

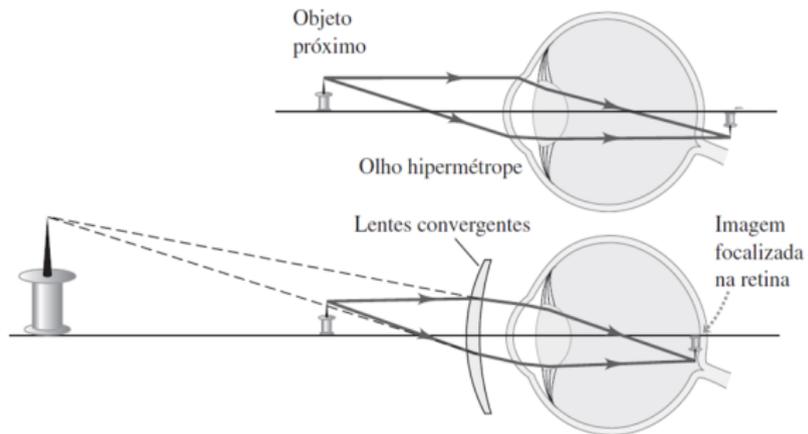




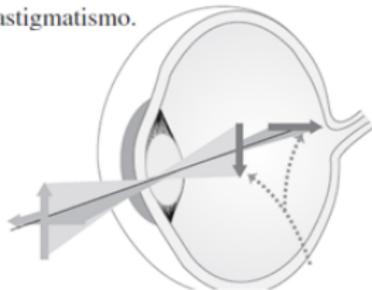




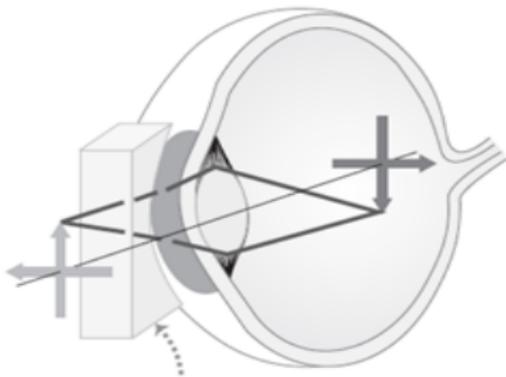




astigmatismo.

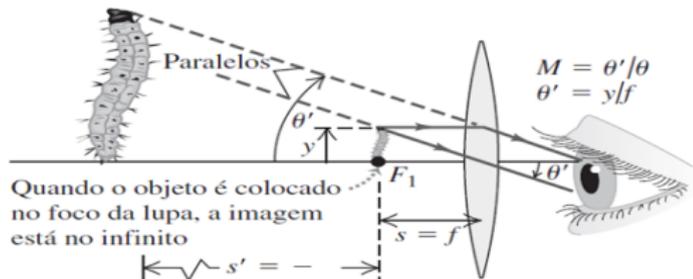
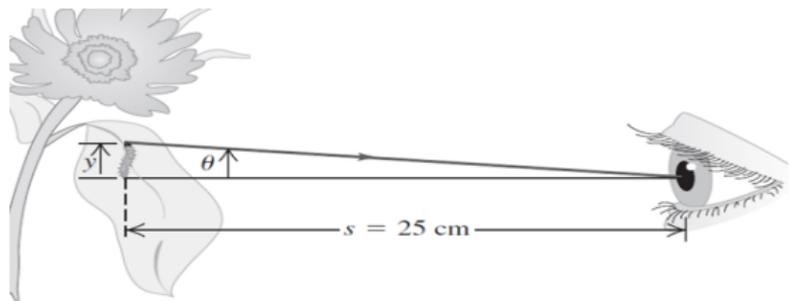


Uma lente cilíndrica corrige o astigmatismo.



► Ampliação angular:

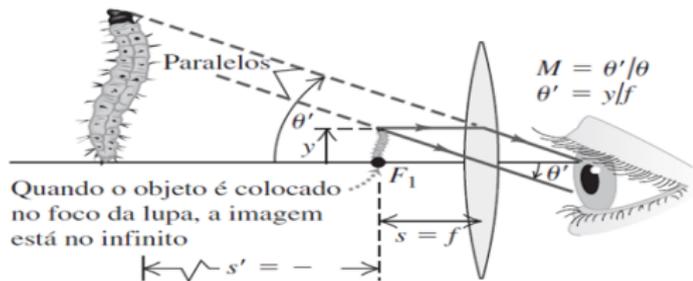
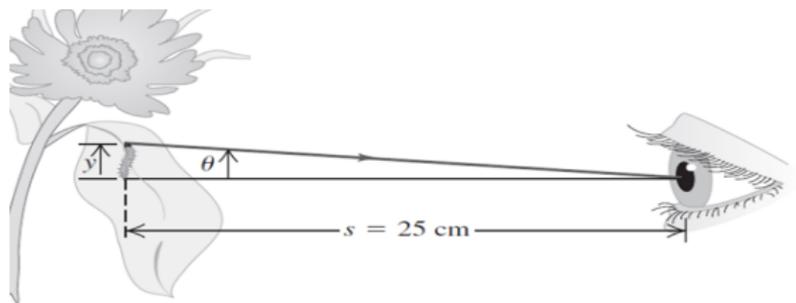
$$M = \frac{\theta'}{\theta}$$



► Ampliação angular:

$$M = \frac{\theta'}{\theta}$$

$$\theta' = \frac{y}{f}$$

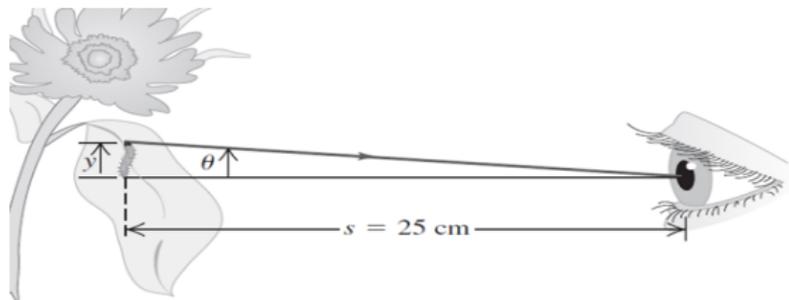


► Ampliação angular:

$$M = \frac{\theta'}{\theta}$$

$$\theta' = \frac{y}{f}$$

$$\theta = \frac{y}{s}$$



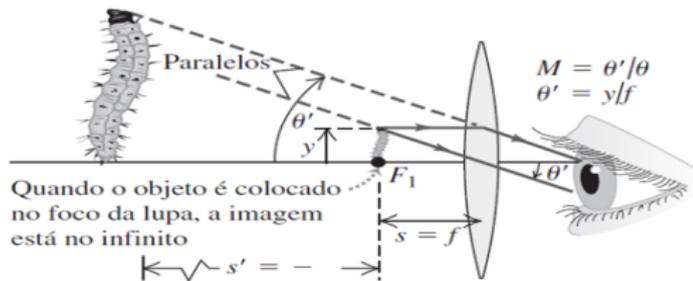
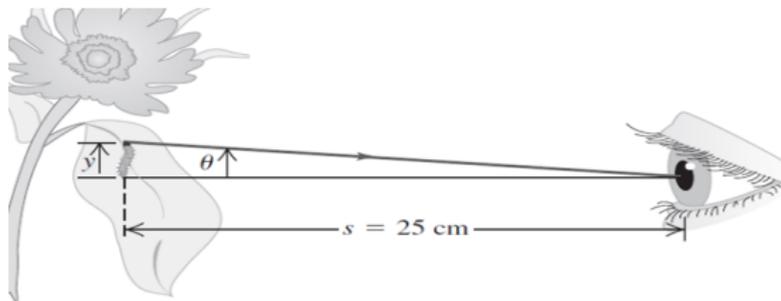
► Ampliação angular:

$$M = \frac{\theta'}{\theta}$$

$$\theta' = \frac{y}{f}$$

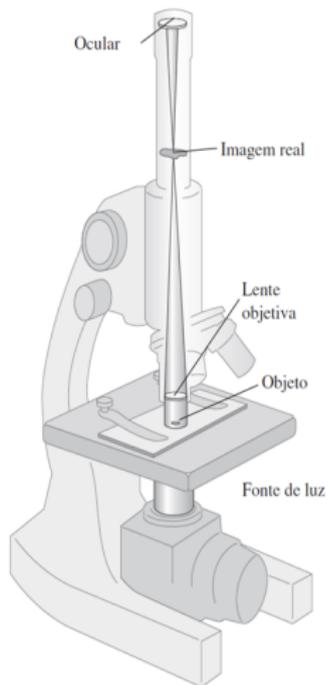
$$\theta = \frac{y}{s}$$

$$M = \frac{s}{f}$$

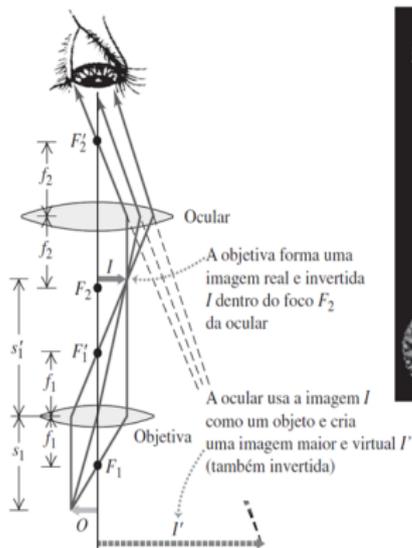


Microscópio

(a) Elementos de um microscópio.



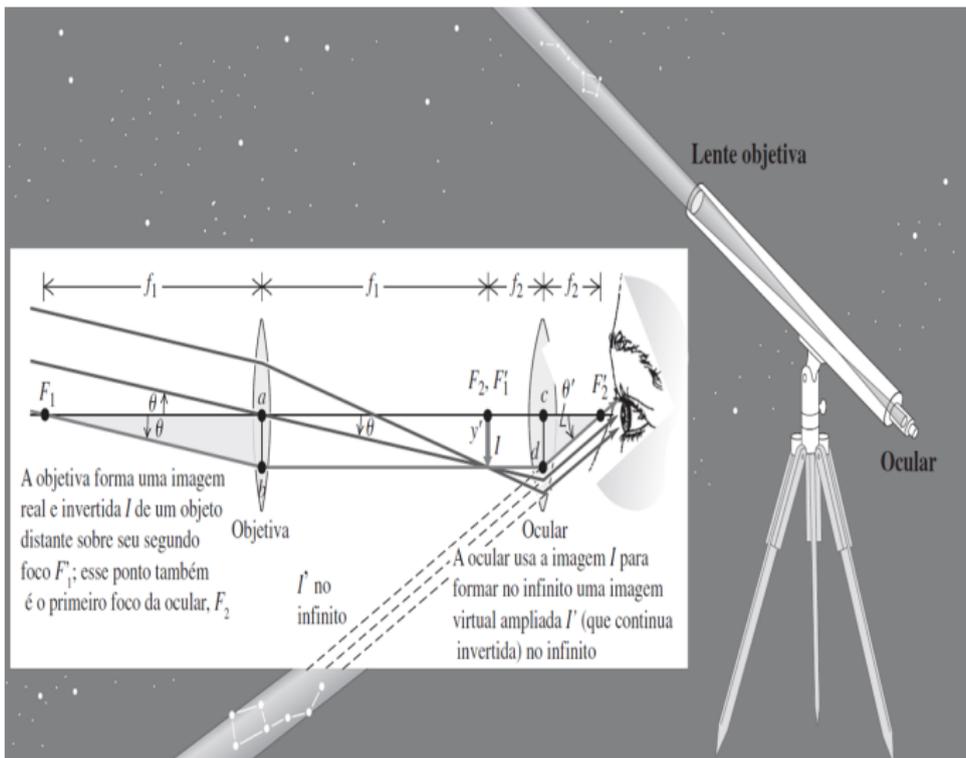
(b) Microscópio ótico.



(c) Algas unicelulares de água doce (*Micrasterias denticulata*).



Telescópio



Telescópio

