

Óptica

Geométrica

# Introdução

Na faixa de comprimentos de onda da radiação E/M há três ou mais regiões de aproximações de interesse prático.

E uma dessas regiões é a óptica geométrica, que é a primeira aproximação.

Ela corresponde ao caso quando o comprimento de onda dos fótons é pequeno comparado com as dimensões dos equipamentos de medição (e a energia dos fótons é pequena comparada com a sensibilidade destes equipamentos).

Na sequência, se o comprimento de onda é comparável ao tamanho do equipamento (mas as energias continuam a serem desprezíveis) temos a óptica física (teoria clássica da radiação eletromagnética).

Finalmente, para comprimentos de onda muito pequenos (altas energias) quando a energia do fóton é muito maior que a sensibilidade de nosso equipamento, as coisas ficam fáceis de novo, podemos desconsiderar o caráter ondulatório e considerar o fóton como uma partícula

# Introdução

Qual o processo pelo qual vemos?

Qual é a relação entre o ângulo de incidência e o ângulo de reflexão?

Princípios básicos da óptica geométrica:

1. A luz se propaga em linha reta
2. A luz não interfere com outros raios de luz que ela cruza  
(um dos argumentos mais fortes utilizado por Huygens na defesa da teoria ondulatória da luz)

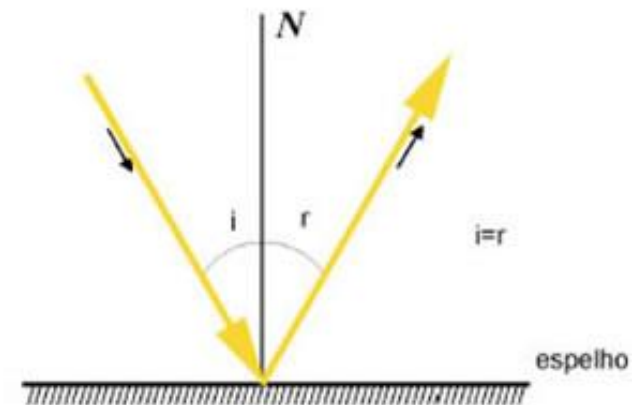


Estas são as ideias básicas que levam á óptica geométrica estudada desde a antiguidade, inicialmente nos sistemas mais simples, como os espelhos planos.

A primeira pergunta foi qual a relação entre o ângulo de incidência e o ângulo de reflexão?

A resposta foi fácil: são iguais.

$$i = r$$

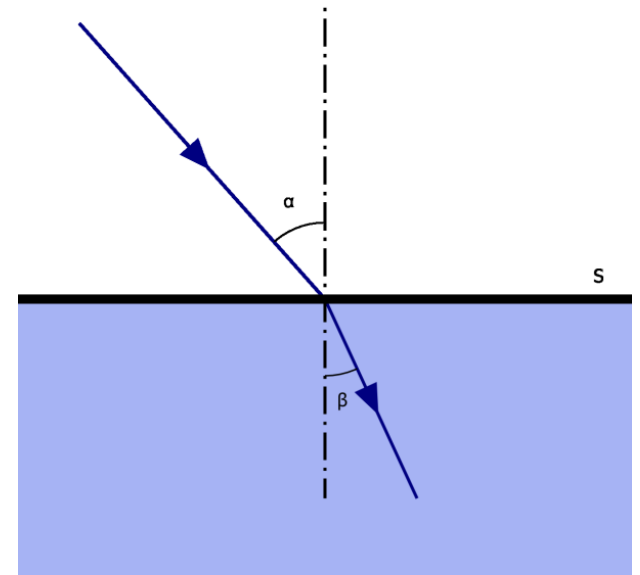


# Introdução

Mais difícil foi analisar o caso quando temos refração.

140 anos AC Cláudio Ptolomeu obteve uma tabela para a refração entre o ar e a água.

Método científico: Observamos, medimos e tentamos encontrar a regra que conecta os dados.



## Cláudio Ptolomeu. 140 AC

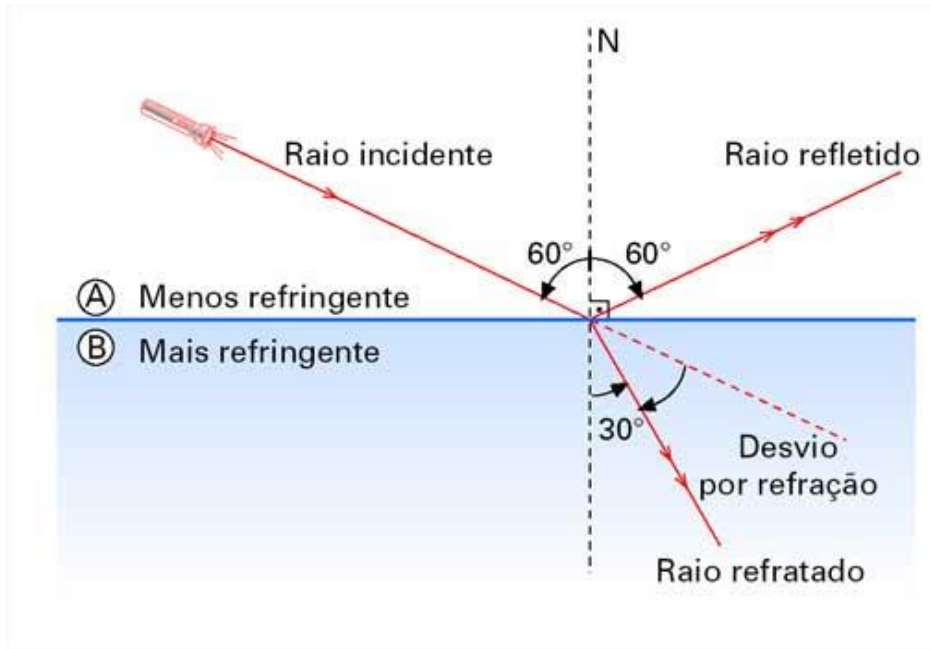
Ângulo no ar	Ângulo na água
10	8
20	15
30	22
40	29
50	35
60	40
70	45
80	50

# Introdução

Somente em **1621** Willebrord Snell encontrou esta regra  $n_A \cdot \text{sen } i = n_B \cdot \text{sen } r$  ou  $\text{sen } i = n \cdot \text{sen } r$

$$n_A < n_B$$

*“Incide num meio mais refringente”*



## Comparando tabelas

Ângulo no ar	Ângulo na água Ptolomeu	Ângulo na água Snell
10	8	7
20	15	15
30	22	22
40	29	29
50	35	35
60	40	40
70	45	45
80	50	48

# Dois Tipos de Imagens

Para que alguém possa ver um objeto, é preciso que os olhos interceptem alguns dos raios luminosos que partem do objeto e os redirecione para a retina. O sistema visual identifica arestas, orientações, texturas, formas e cores, e oferece à consciência uma **imagem** (uma reprodução obtida a partir de raios luminosos) do objeto.

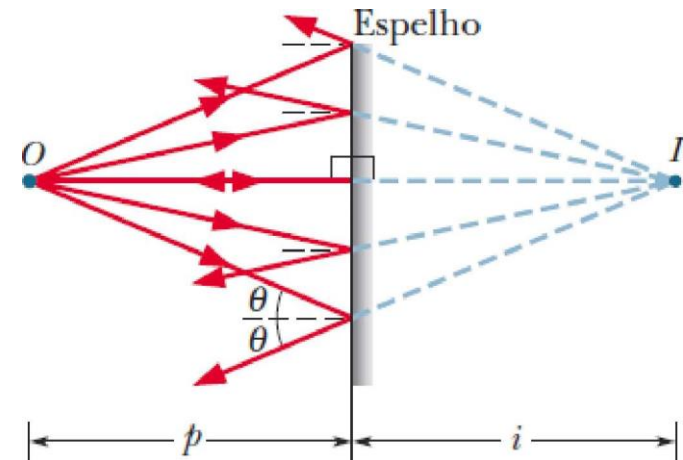
Se a imagem depende de um observador para existir e pode corresponder ou não a um objeto real, é chamada de **imagem virtual**.

Se a imagem não depende de um observador para existir, como as imagens que são projetadas nas telas de cinema, é chamada de **imagem real**.

# Espelhos Planos

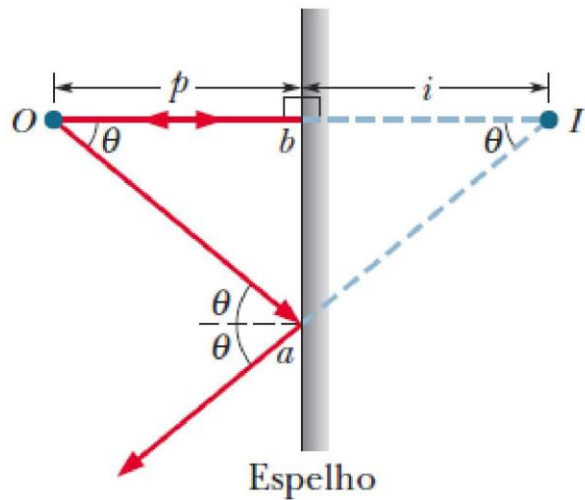
Um espelho é uma superfície que reflete raios luminosos em uma direção definida em vez de absorve-los ou os espalha em todas as direções. Uma superfície metálica polida se comporta como um espelho; uma parede de concreto, não. Um espelho plano é uma superfície refletora plana.

Em um espelho plano, a luz parece vir de um objeto situado do outro lado do espelho.



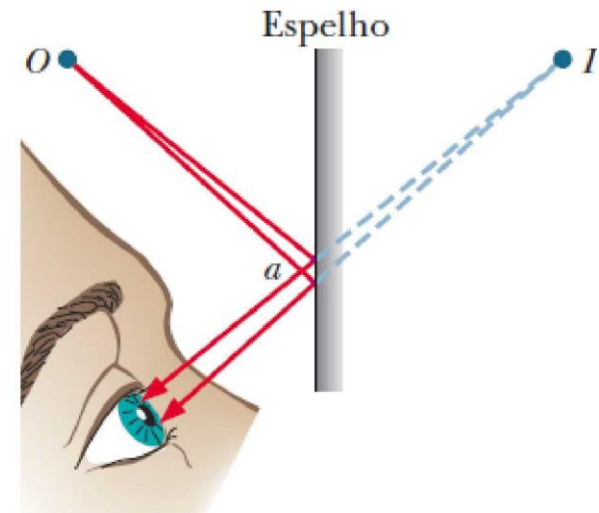
Uma fonte luminosa pontual  $O$ , chamada de *objeto*, está a uma distância  $p$  de um espelho plano. Raios luminosos provenientes de  $O$  são refletidos pelo espelho. Se o olho do observador intercepta os raios refletidos, ele tem a impressão de que existe uma fonte luminosa pontual  $I$  atrás do espelho, a uma distância  $i$ . A fonte fictícia é uma imagem virtual do objeto  $O$ .

# Espelhos Planos



$$Ib = Ob \quad i = -p \quad (\text{espelho plano})$$

Dois raios são desenhados na Figura. O raio  $Oa$  faz um ângulo arbitrário  $\theta$  com a normal à superfície do espelho; o raio  $Ob$  é perpendicular ao espelho.

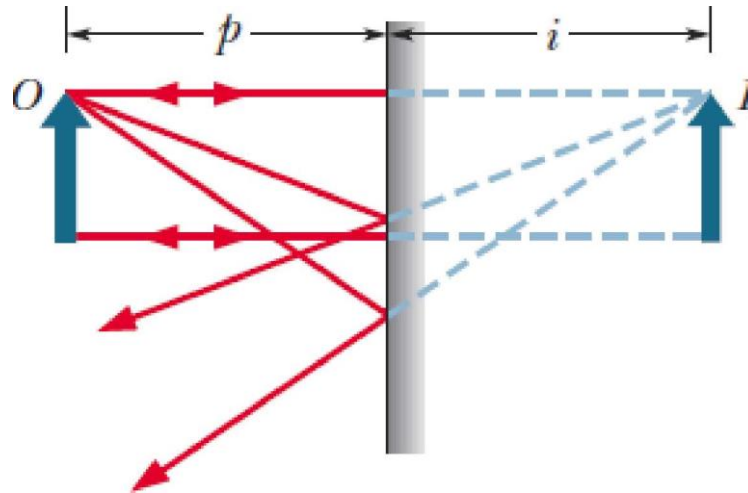


Um feixe estreito de raios provenientes de  $O$  penetra no olho depois de ser refletido pelo espelho. Apenas uma pequena região do espelho, nas vizinhanças do ponto  $a$ , está envolvida na reflexão. A luz parece se originar em um ponto  $I$  atrás do espelho.



# Espeelhos Planos

Em um espelho plano, as distancias entre o objeto e o espelho e entre a imagem e o espelho são iguais.

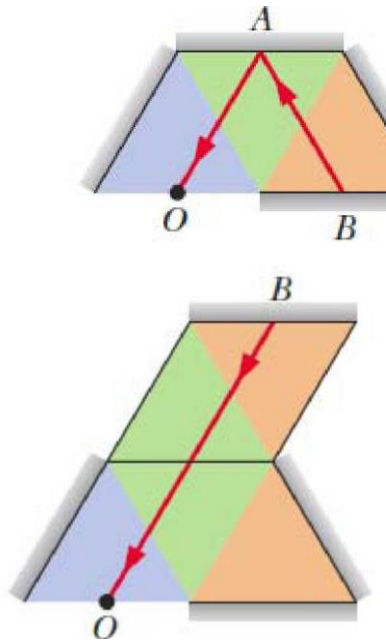


Um objeto de dimensões macroscópicas  $O$  e sua imagem virtual  $I$  em um espelho plano.

# Combinação de Espelhos Planos

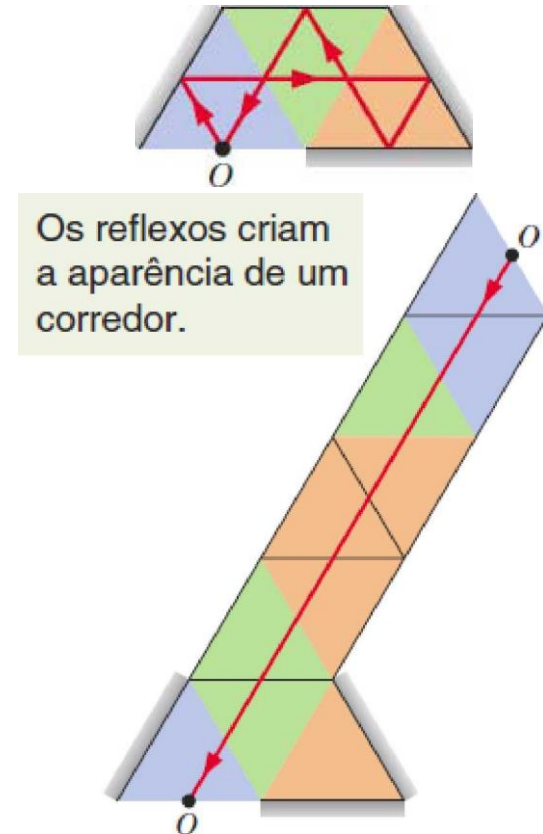
Imagine uma combinação de espelhos planos, onde as paredes são cobertas de espelhos do piso ao teto. Andando no interior de um desses labirintos, o que se vê na maioria das direções e uma superposição confusa de reflexos.

Caso 1. De onde parece vir a luz?



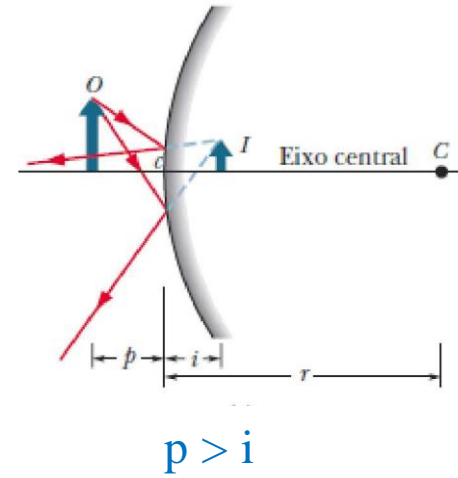
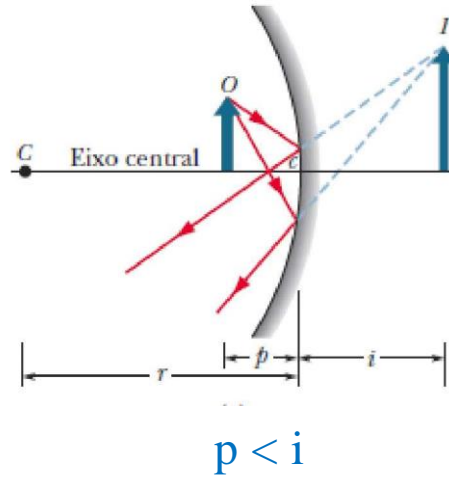
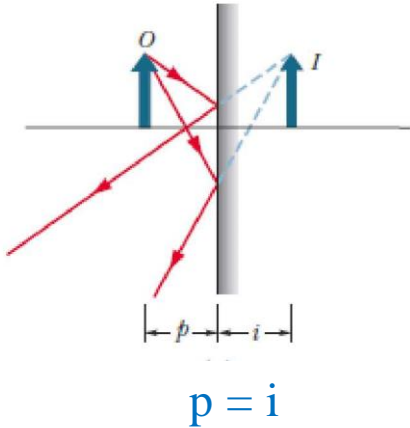
O raio proveniente do espelho *B* chega ao observador em *O* depois de ser refletido pelo espelho *A*. O espelho *B* parece estar atrás do espelho *A*.

Caso 2. De onde parece vir a luz?



O raio que parte de *O* volta a *O* depois de sofrer quatro reflexões. O observador vê uma imagem virtual de si próprio na extremidade de um corredor aparente.

# Espelhos Esféricos



Um espelho côncavo possui as seguintes características:

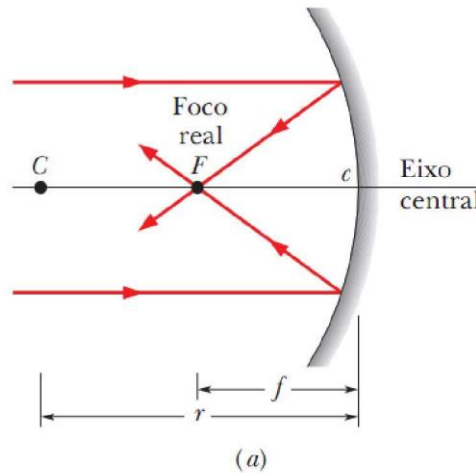
1. O *centro de curvatura*  $C$  (o centro da esfera a qual pertence a superfície do espelho) que estava a uma distância infinita no caso do espelho plano, agora está mais próximo, à frente do espelho.
2. O *campo de visão* (a extensão da cena vista pelo observador) é menor que o do espelho plano.
3. A *distância da imagem* é maior que a do espelho plano.
4. O *tamanho da imagem* é maior que o do espelho plano. É por isso que muitos espelhos de maquiagem são côncavos.

Quais as características de um espelho convexo?

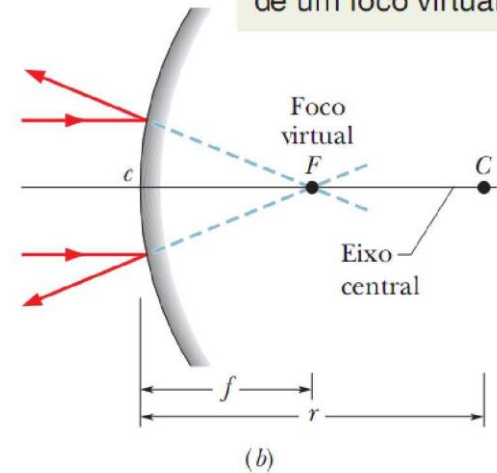
# Espelhos Esféricos

Em um espelho côncavo, raios luminosos paralelos incidentes convergem para um foco real situado no ponto  $F$ , do mesmo lado do espelho que os raios. Em um espelho convexo, raios luminosos paralelos incidentes parecem divergir de um foco virtual situado no ponto  $F$ , do lado oposto do espelho.

Para localizar o foco, acompanhe raios paralelos ao eixo central.



Os prolongamentos dos raios mostram a posição de um foco virtual.

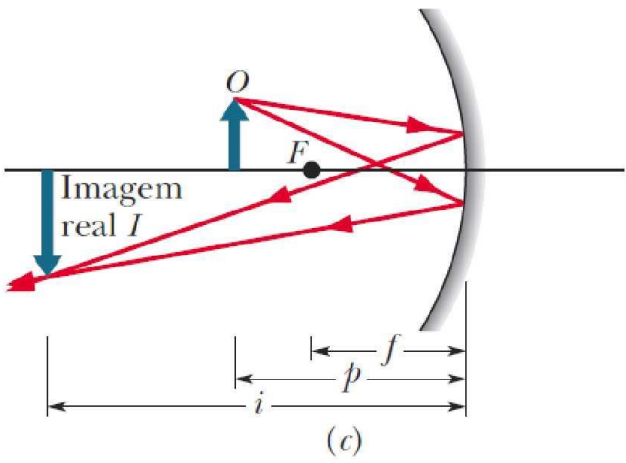
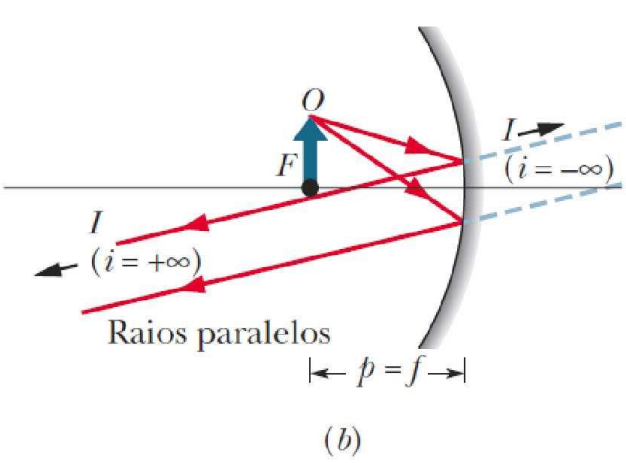
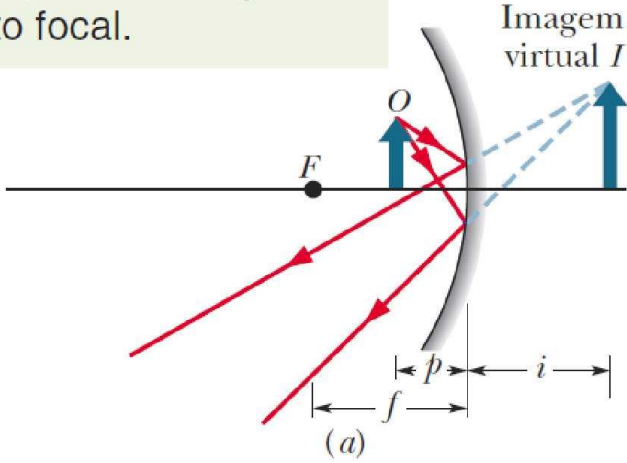


Se  $f$  e a distância focal (distância entre o centro do espelho e o ponto focal) e  $r$  e o raio de curvatura do espelho, qual a relação entre eles?

$$f = \frac{1}{2}r$$

# Espelhos Esféricos: a posição do objeto

O tipo de imagem varia de acordo com a posição do objeto em relação ao ponto focal.



# Imagens Produzidas por Espelhos Esféricos

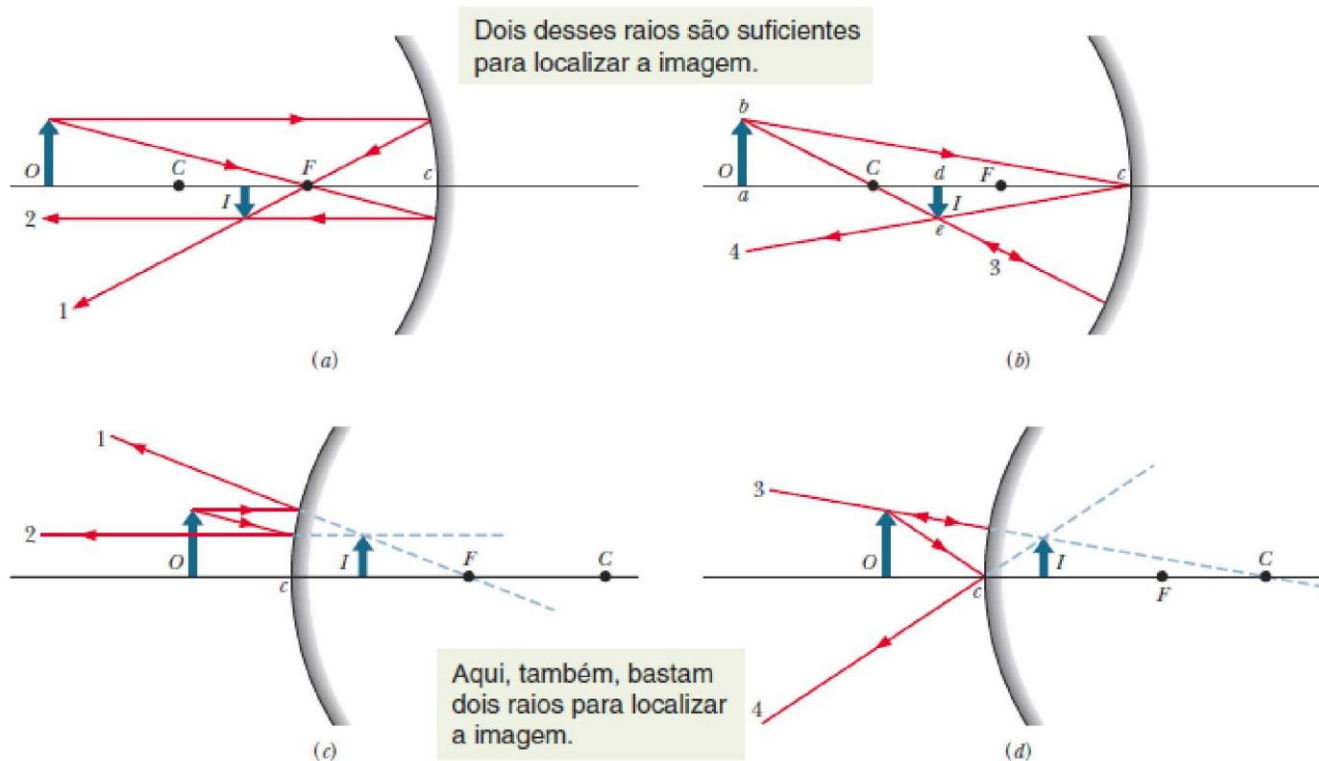
Quando os raios luminosos de um objeto fazem apenas pequenos ângulos com o eixo central de um espelho esférico, a distância do objeto,  $p$ , a distância da imagem,  $i$ , e a distância focal,  $f$ , estão relacionadas através da equação

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{i} = \frac{1}{f}$$

O tamanho de um objeto ou imagem, medido perpendicularmente ao eixo central do espelho, é chamado de altura do objeto ou imagem. Seja  $h$  a altura de um objeto e  $h'$  a altura da imagem. Nesse caso, a razão  $h'/h$  e chamada de ampliação lateral do espelho e representada pela letra  $m$ .

$$|m| = \frac{h'}{h} = -\frac{i}{p}$$

# Imagens Produzidas por Espelhos Esféricos



**Podemos localizar uma imagem usando os seguintes raios:**

1. Um raio (ou prolongação) inicialmente paralelo ao eixo central, que passa pelo ponto focal  $F$  depois de ser refletido pelo espelho (raio 1 da Fig. a e raio 2 da Fig. c).
2. Um raio (ou prolongação) que passa pelo ponto focal  $F$  e se torna paralelo ao eixo central depois de ser refletido pelo espelho (raio 2 da Fig. a e raio 1 da Fig. c).
3. Um raio que passa pelo centro de curvatura  $C$  do espelho e volta a passar pelo centro de curvatura depois de ser refletido (raio 3 da Fig. b).
4. Um raio que incide no centro  $c$  do espelho e é refletido com um ângulo de reflexão igual ao ângulo de incidência (raio 4 da Fig. d).

# Imagens Produzidas por Espelhos Esféricos

Observe a figura. O raio  $bc$  é refletido no ponto  $c$  do espelho e, portanto, o ângulo de incidência e o ângulo de reflexão são iguais.

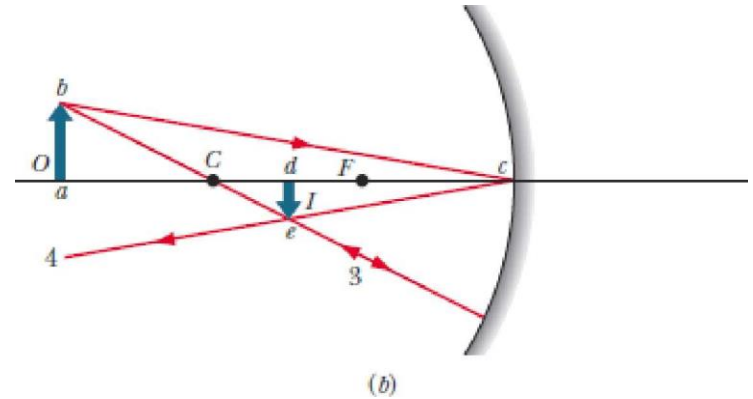
Como os triângulos retângulos  $abc$  e  $dec$  da figura são semelhantes (possuem os mesmos ângulos), podemos escrever

$$\frac{de}{ab} = \frac{cd}{ca}$$

A razão do lado esquerdo (a menos do sinal) é a ampliação lateral  $m$  do espelho. Como as imagens estão invertidas a ampliação lateral por definição é negativa.

Chamamos a esta razão de  $-m$ . Como  $cd = i$  e  $ca = p$ , temos que a ampliação  $m$  é:

$$m = -\frac{i}{p}$$





## Exemplo: Imagem Produzida por um Espelho Esférico

Uma tarântula de altura  $h$  está diante de um espelho esférico cuja distância focal tem valor absoluto  $|f| = 40$  cm. A imagem da tarântula produzida pelo espelho tem a mesma orientação que a tarântula e uma altura  $h' = 0,20h$ .

(a) A imagem é real ou virtual? Está do mesmo lado do espelho que a tarântula ou do lado oposto?

*Resposta:* Como a imagem tem a mesma orientação que a tarântula (o objeto), é virtual e está localizada do outro lado do espelho.

(b) O espelho é côncavo ou convexo? Qual é o valor da distância focal  $f$ , incluindo o sinal?

### IDEIA-CHAVE

Não podemos saber de que tipo é o espelho pelo tipo de imagem, já que tanto os espelhos côncavos como os convexos podem produzir imagens virtuais. Além disso, não podemos saber de que tipo é o espelho a partir do sinal da distância focal, obtido com o uso da Eq. 34-3 ou da Eq. 34-4, porque não dispomos de informações suficientes para aplicar uma dessas equações. Entretanto, podemos usar a informação a respeito do aumento.

*Cálculos* Sabemos que a relação entre a altura da imagem  $h'$  e a altura do objeto  $h$  é 0,20. Assim temos:

$$|m| = \frac{h'}{h} = 0,20$$

Como o objeto e a imagem têm a mesma orientação, sabemos que  $m$  é positivo:  $m = +0,20$ . Substituindo este valor na equação e explicitando  $i$ , obtemos:

$$i = -0,20p,$$

o que não parece de grande utilidade para determinar  $f$ . Entretanto, podemos usar este resultado para eliminar  $i$ . Fazendo  $i = -0,20p$  temos:

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{i} = \frac{1}{f} = \frac{1}{-0,2p} + \frac{1}{p} = \frac{1}{p}(-5 + 1)$$

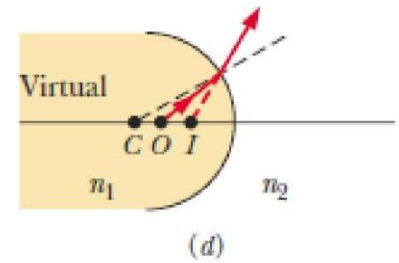
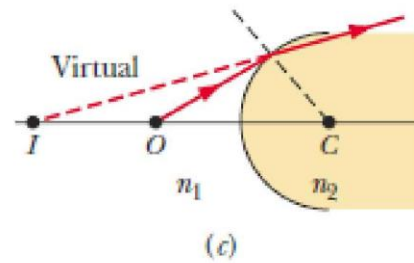
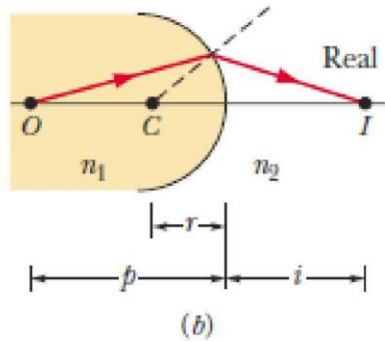
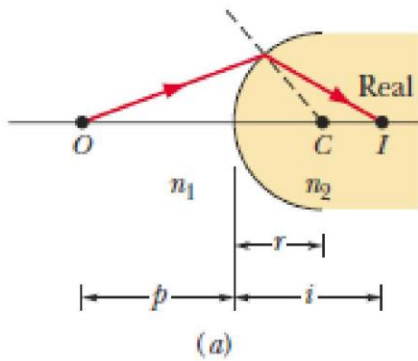
e, portanto,

$$f = -40 \text{ cm.}$$

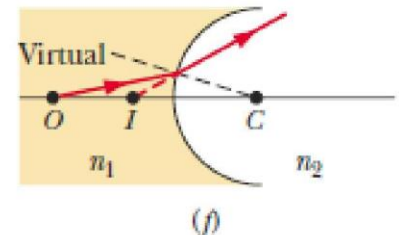
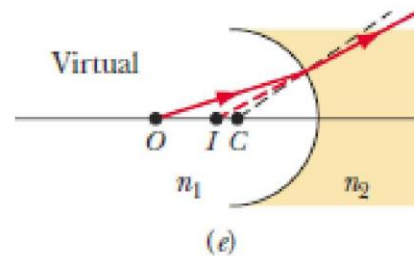
(Resposta)

Como  $p$  é negativa, o espelho é convexo.

# Refração em Interfaces Esféricas



Na figura são apresentados seis modos pelos quais uma imagem pode ser formada por raios refratados entre meios com índices de refração  $n_1$  e  $n_2$  ( $n_1$  é sempre do lado do objeto)



$$\frac{n_1}{p} + \frac{n_2}{i} = \frac{n_2 - n_1}{r}$$

**Resolver:** Um mosquito do período jurássico foi encontrado no interior de um bloco de âmbar cujo índice de refração é 1,6. Uma das superfícies do bloco é esfericamente convexa, com um raio de curvatura de 3,00 mm (ver figura). A cabeça do mosquito se encontra no eixo central dessa superfície e quando observada ao longo do eixo central, parece estar a 5,0 mm de profundidade. A que profundidade se encontra realmente?



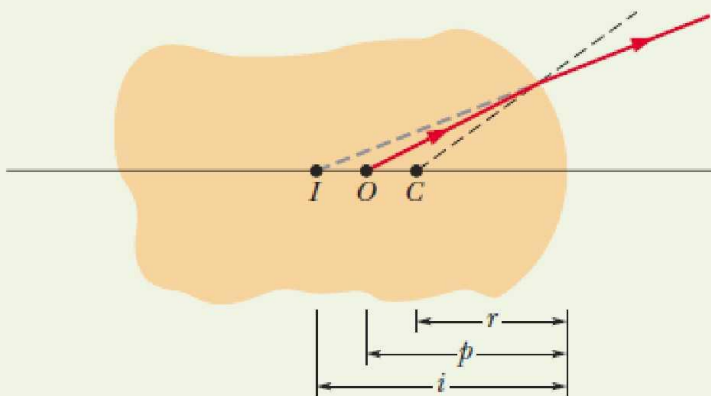
## Solução:

A cabeça parece estar a 5,0 mm da superfície porque os raios luminosos que chegam ao olho do observador são refratados na interface entre o âmbar e o ar. De acordo com a equação da refração, a distancia da imagem  $i$  e a distancia do objeto  $p$  podem ser bem diferentes. Para aplicar a equação ao problema, devemos observar o seguinte:

1. Como o objeto (a cabeça) e sua imagem estão do mesmo lado da interface, a imagem é virtual e, portanto, o sinal da imagem é negativo:  $i = -5,0$  mm.
2. Como sempre supomos que o objeto está no meio de Índice de Refração  $n_1$ ,  $n_1 = 1,6$  e  $n_2 = 1,0$ .
3. Como o objeto se encontra diante de uma interface côncava, o raio de curvatura  $r$  é negativo:  $r = -3,0$  mm.

### Cálculos

Fazendo essas substituições na equação da refração:



Um bloco de âmbar contendo um mosquito do período jurássico, com a cabeça no ponto  $O$ . A superfície refratora esférica do lado direito, cujo centro de curvatura é o ponto  $C$ , produz uma imagem  $I$  para um observador que intercepta os raios luminosos provenientes do objeto.

$$\frac{1,6}{p} + \frac{1}{-5} = \frac{1 - 1,6}{-3}$$

$$p = 4,0 \text{ mm}$$

# Lentes Delgadas

Uma **lente** é um corpo transparente limitado por duas superfícies refratoras com um eixo central em comum. Esse eixo central comum é o eixo central da lente.

Uma lente que faz com que raios luminosos inicialmente paralelos ao eixo central se aproximem do eixo é chamada de **lente convergente**; uma lente que faz com que os raios se afastem do eixo central é chamada de **lente divergente**.

**Lente delgada:** é uma lente cuja largura na parte mais espessa é muito menor que a distância ao objeto, ou a distância à imagem ou que qualquer um dos raios de curvatura das suas superfícies da lente. Considerando apenas os raios luminosos que fazem ângulos pequenos com o eixo central e chamando de  $f$  a distância focal da lente, temos:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{p} + \frac{1}{i} \quad (\text{lente delgada})$$

$$\frac{1}{f} = (n - 1) \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \quad (\text{lente delgada no ar})$$

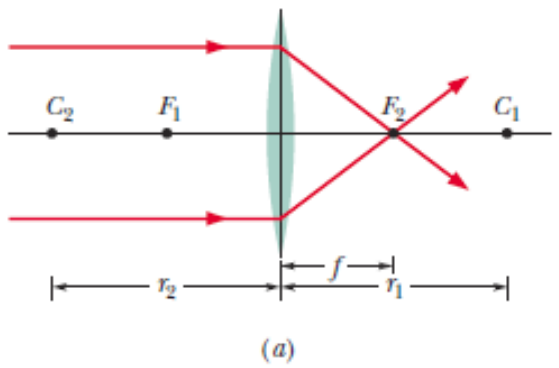
Esta última equação é chamada de equação do fabricante de lentes.

Onde a distância focal  $f$  é definida por:

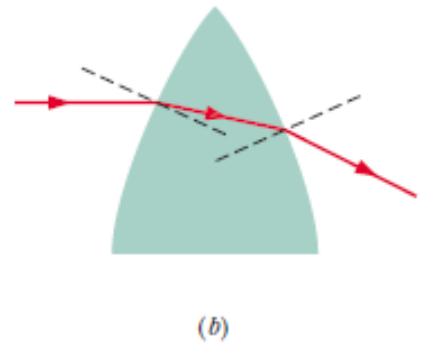


# Lentes Delgadas: o foco

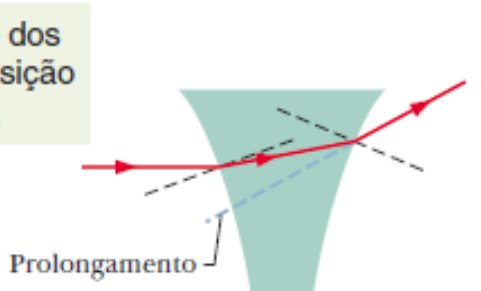
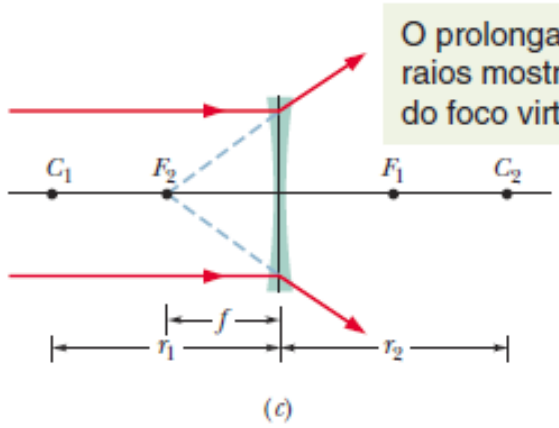
Para localizar o foco  $F_1$ , acompanhe raios paralelos ao eixo central.



Os raios mudam de direção apenas nas superfícies.



O prolongamento dos raios mostra a posição do foco virtual  $F_2$ .

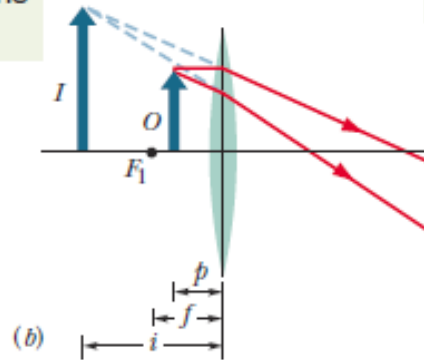
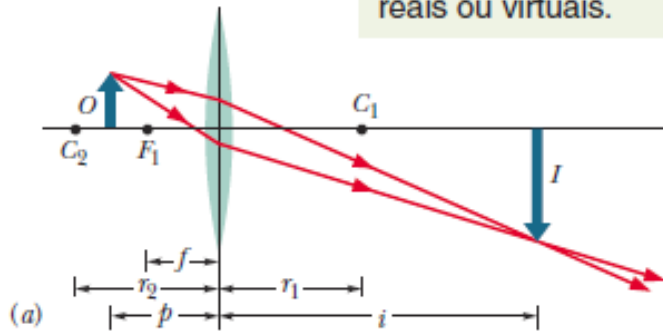


(a) Raios luminosos inicialmente paralelos ao eixo central de uma lente convergente são desviados pela lente e convergem para o ponto focal real  $F_2$ . A lente é mais fina que no desenho; na verdade, supomos que todo o desvio ocorra em um único plano, representado na figura por uma reta vertical passando pelo centro da lente. (b) Ampliação da parte superior da lente representada em (a); as linhas tracejadas são as normais à superfície nos pontos de entrada e saída de um raio luminoso. Observe que os desvios que o raio sofre ao entrar e ao sair da lente são no mesmo sentido e tendem a aproximá-lo do eixo central. (c) Os mesmos raios paralelos divergem depois de passar por uma lente divergente. Os prolongamentos dos raios divergentes passam por um ponto focal virtual  $F_2$ . (d) Ampliação da parte superior da lente representada em (c). Observe que os desvios que o raio sofre ao entrar e ao sair da lente são no mesmo sentido e tendem a afastá-lo do eixo central.

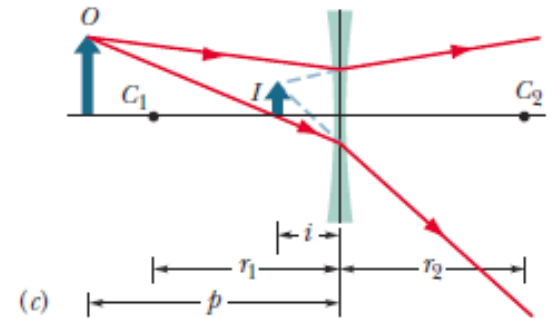
# Lentes Delgadas: Localizando Imagens

As imagens virtuais produzidas por lentes ficam do mesmo lado que o objeto e as imagens reais ficam do lado oposto

Lentes convergentes podem produzir imagens reais ou virtuais.



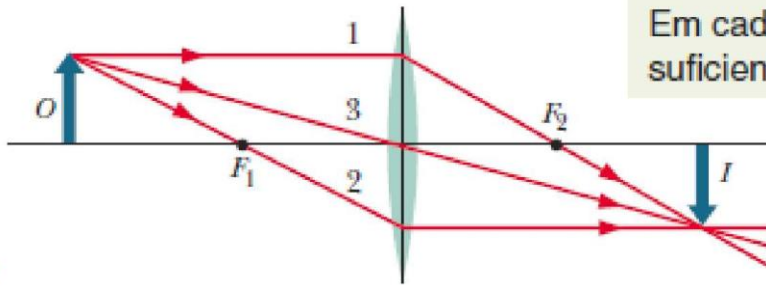
Lentes divergentes podem produzir apenas imagens virtuais.



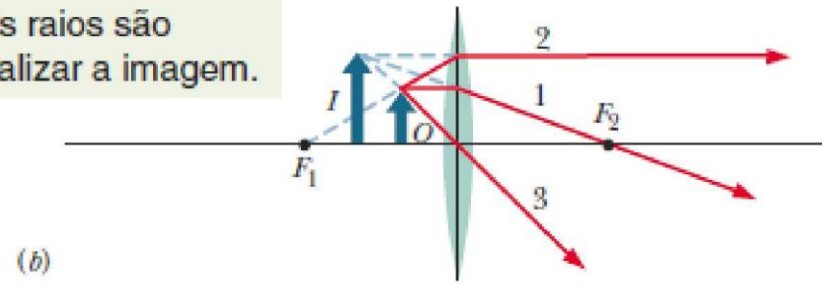
(a) Uma lente convergente forma uma imagem  $I$  real e invertida quando o objeto  $O$  está mais distante da lente que o ponto focal  $F_1$ . (b) A imagem  $I$  é virtual e tem a mesma orientação que o objeto  $O$  quando  $O$  está mais próximo da lente que o ponto focal. (c) Uma lente divergente forma uma imagem virtual  $I$ , com a mesma orientação que o objeto  $O$ , qualquer que seja a distância do objeto.



# Lentes Delgadas: Localizando Imagens



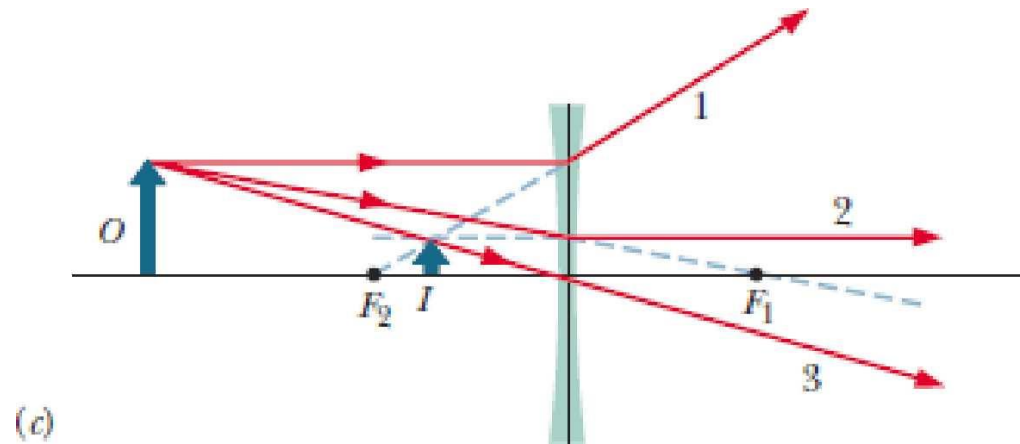
Em cada figura, dois raios são suficientes para localizar a imagem.



- Um raio inicialmente paralelo ao eixo central da lente passa pelo ponto focal  $F_2$  (raio 1 das figuras).

- Um raio que passa pelo ponto focal  $F_1$  sai da lente, paralelo ao eixo central (raio 2 das figuras).

- Um raio que passa pelo centro da lente sai da lente sem mudar de direção (raio 3 das figuras).



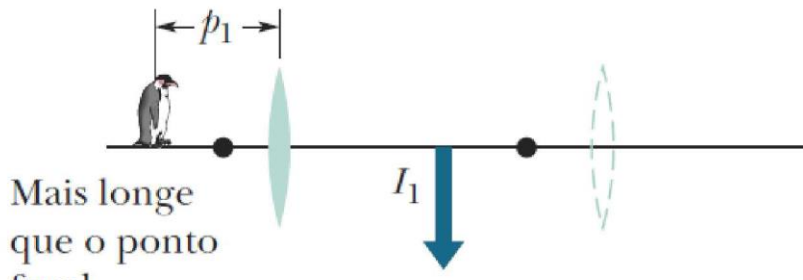
# Lentes Delgadas: Sistema de Duas Lentes

## 1ª parte

Ignorando a lente 2, localizamos a imagem  $I_1$  produzida pela lente 1.

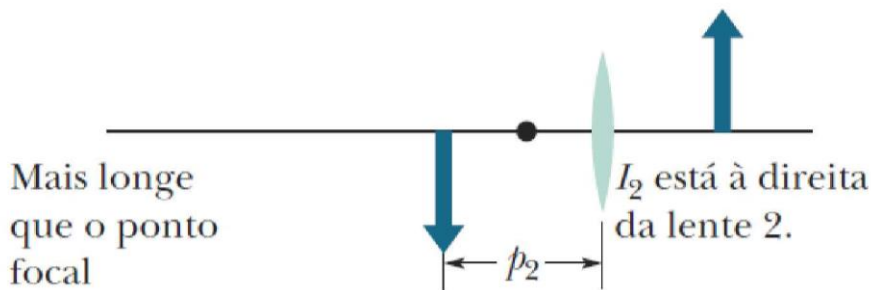
Verificamos se a imagem esta a esquerda ou a direita da lente, se é real ou virtual e se tem a mesma orientação que o objeto.

Calculamos a ampliação lateral  $m_1$ .



## 2ª parte

Ignorando a lente 1, tratamos  $I_1$  como o objeto da lente 2 e localizamos a imagem  $I_2$  produzida pela lente 2.



Se  $I_1$  esta a direita da lente 2 (do outro lado da lente 2), consideramos a distancia do objeto  $p_2$  como um numero negativo para localizar a posição final da imagem,  $I_2$ . Finalmente, calculamos a ampliação lateral  $m_2$ .

A ampliação total e dada por  $M = m_1 \cdot m_2$

Se  $M$  e positivo, a imagem final tem a mesma orientação que o objeto.



# Imagem Produzida por uma Lente Simétrica Delgada

**Resolver:** Um inseto está sobre o eixo central de uma lente simétrica delgada, a 20 cm da lente. A ampliação lateral da lente é  $m = -0,25$  e o índice de refração do material de que é feita a lente é 1,65. (a) Determine o tipo de imagem produzido pela lente; o tipo de lente; se o inseto está mais próximo ou mais distante da lente que o ponto focal; de que lado da lente é formada a imagem; se a imagem é invertida ou não.

A partir do valor de  $m$  e de acordo com a conhecida equação  $m = -i/p$  temos:

$$i = -mp = 0,25p$$

Assim, não é preciso fazer nenhum cálculo para responder às perguntas:

1. Como  $p$  é sempre positivo, sabemos que  $i$  é positivo.
2. Isso significa que a imagem é real e, portanto, a lente é convergente (as lentes convergentes são as únicas que produzem imagens reais).
3. O objeto está mais distante da lente que o ponto focal (caso contrário, a imagem seria virtual).
4. Além disso, a imagem é invertida e fica do lado oposto da lente, como todas as imagens reais formadas por lentes convergentes.

Quais são os dois raios de curvatura da lente?

# Imagem Produzida por uma Lente Simétrica Delgada

Conhecemos  $p$  (é um dos dados do problema), mas não conhecemos  $i$ . Assim, o primeiro passo é determinar o valor de  $i$  usando as conclusões a que chegamos no item anterior. O resultado é o seguinte:  $i = (0,25)(20 \text{ cm}) = 5,0 \text{ cm}$ .

Utilizando a equação das lentes finas:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{p} + \frac{1}{i} = \frac{1}{20 \text{ cm}} + \frac{1}{5,0 \text{ cm}},$$

e portanto  $f = 4,0 \text{ cm}$

De acordo com

$$\frac{1}{f} = (n - 1) \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) = (n - 1) \left( \frac{1}{+r} - \frac{1}{-r} \right).$$

Substituindo  $f$  e  $n$  por valores numéricos, temos:

$$\frac{1}{4,0 \text{ cm}} = (1,65 - 1) \frac{2}{r},$$

e, portanto,

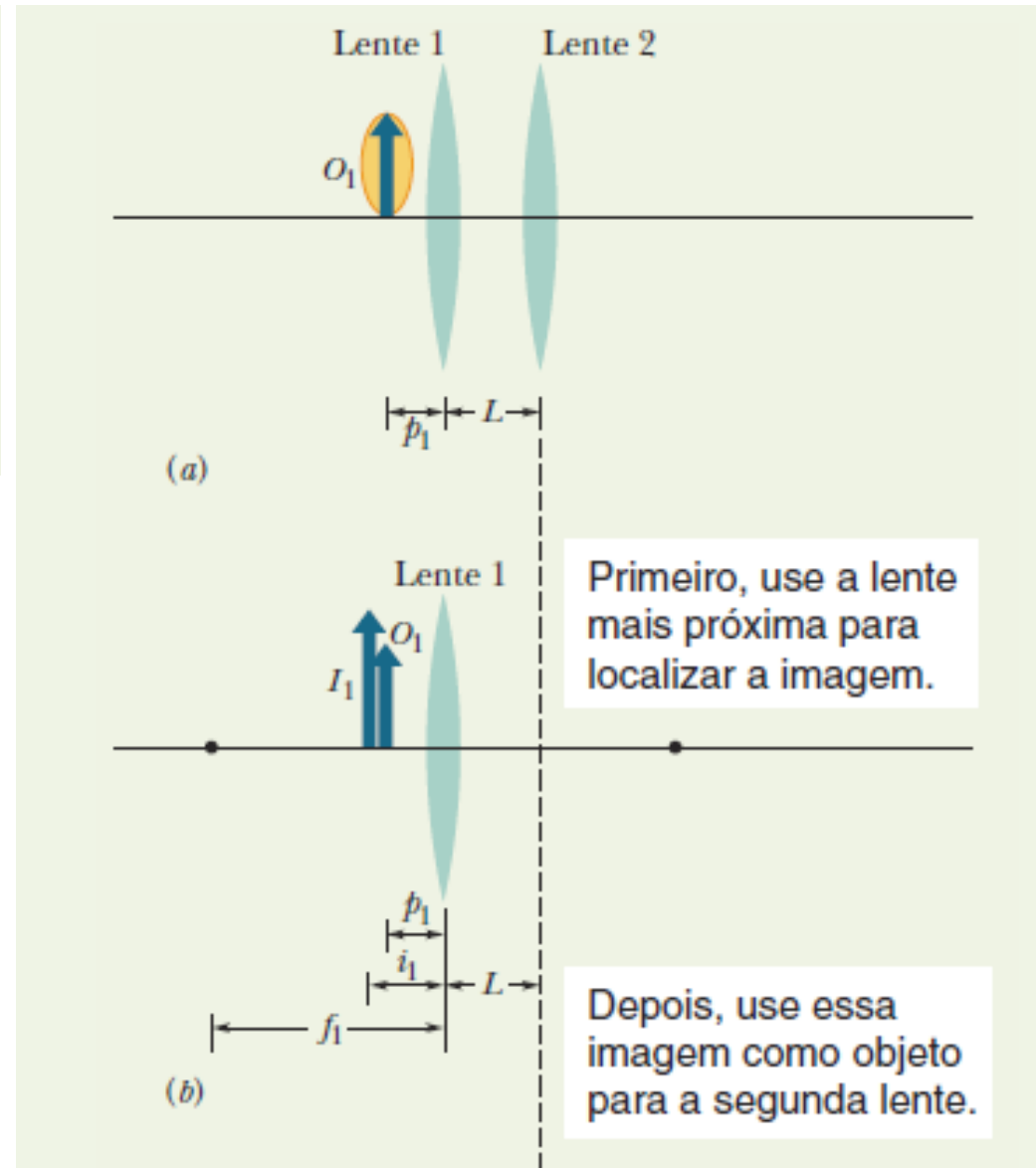
$$r = (0,65)(2)(4,0 \text{ cm}) = 5,2 \text{ cm}. \quad (\text{Resposta})$$

# Imagem Produzida por uma Lente Simétrica Delgada

**Resolver:** A figura mostra uma semente de abóbora colocada diante de duas lentes delgadas simétricas coaxiais 1 e 2, de distâncias focais  $f_1 = +24$  cm e  $f_2 = +9$  cm, respectivamente, separadas por uma distância  $L = 10$  cm.

A semente esta a 6,0 cm da lente 1.

Qual é a localização da imagem da semente?



# Imagem Produzida por uma Lente Simétrica Delgada

Lente 1: Ignorando a lente 2, localizamos a imagem  $I_1$  produzida pela lente 1 aplicando a equação da lente

$$\frac{1}{p_1} + \frac{1}{i_1} = \frac{1}{f_1}$$

Nesta equação, o objeto  $O_1$  para a lente 1 é a semente, que se encontra a 6,0 cm da lente: assim fazemos  $p_1 = +6,0$  cm.

Substituindo os valores temos:

$$\frac{1}{+6,0 \text{ cm}} + \frac{1}{i_1} = \frac{1}{+24 \text{ cm}},$$

O que dá  $i_1 = -8,0$  cm.

Isso significa que a imagem está a 8,0 cm da lente 1, e é virtual. (Poderíamos ter antecipado que a imagem é virtual observando que a semente está mais próxima da lente 1 que o ponto focal).

Como  $I_1$  é virtual, ela está do mesmo lado da lente que o objeto  $O_1$  e tem a mesma orientação.

Agora passemos à segunda parte (determinar a posição da imagem gerada pela lente 2)

# Imagem Produzida por uma Lente Simétrica Delgada

**Lente 2.** Consideramos a imagem  $I_1$ , como o objeto  $O_2$  para a segunda lente e ignoramos a lente 1.

Como o objeto  $O_2$  está mais afastado da lente 2 que o ponto focal, podemos antecipar que a imagem  $I_2$  produzida pela lente 2 é real, invertida e não está do mesmo lado da lente que  $O_2$ .

Os resultados numéricos devem ser compatíveis com essas conclusões.

De acordo com a figura a distancia  $p_2$  entre o objeto  $O_2$  e a lente 2 é dada por

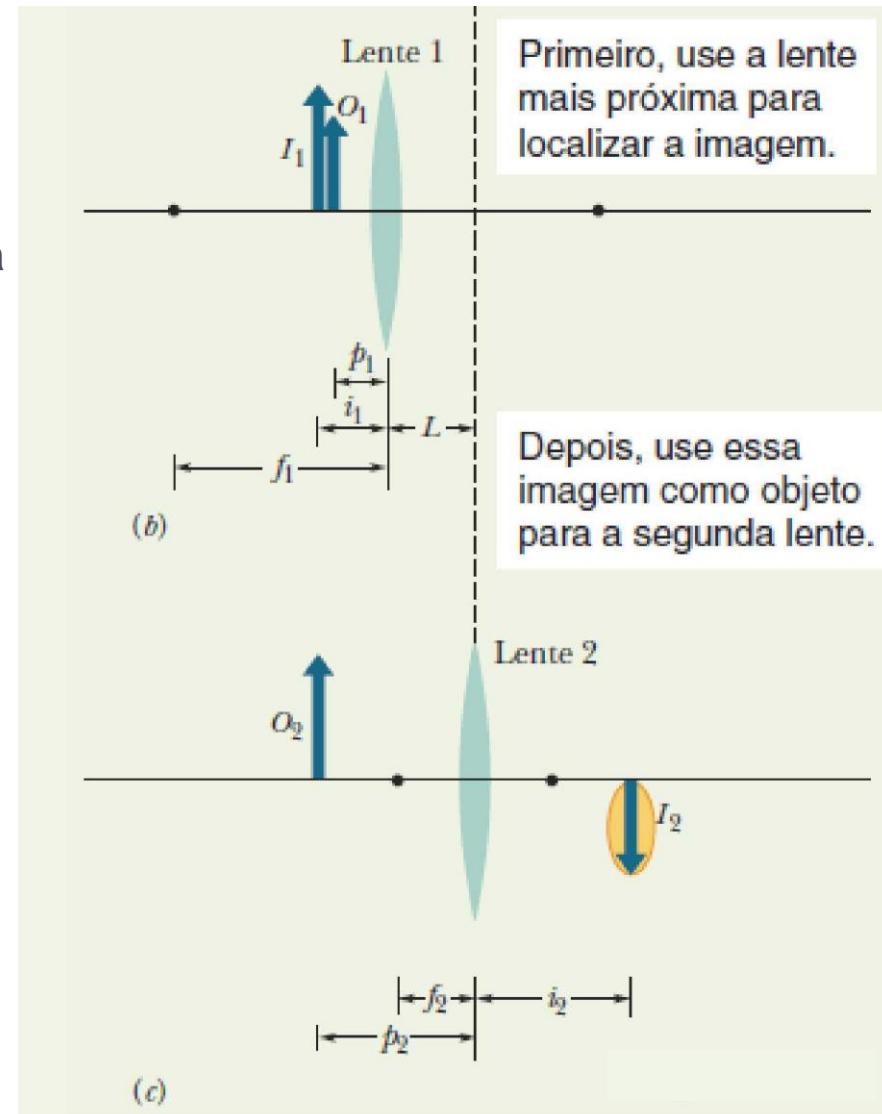
$$p_2 = L + |i_1| = 10 \text{ cm} + 8,0 \text{ cm} = 18 \text{ cm}.$$

Nesse caso teremos:

$$\frac{1}{+18 \text{ cm}} + \frac{1}{i_2} = \frac{1}{+9,0 \text{ cm}}.$$

$$\text{Assim: } i_2 = +18 \text{ cm}$$

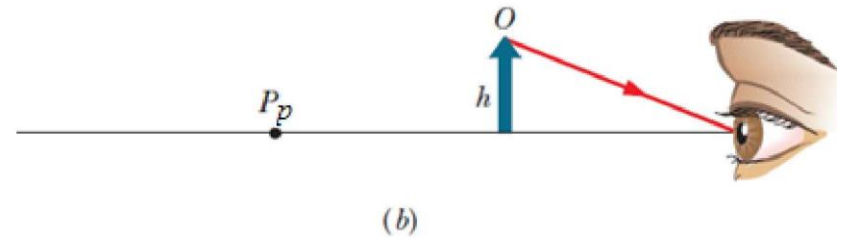
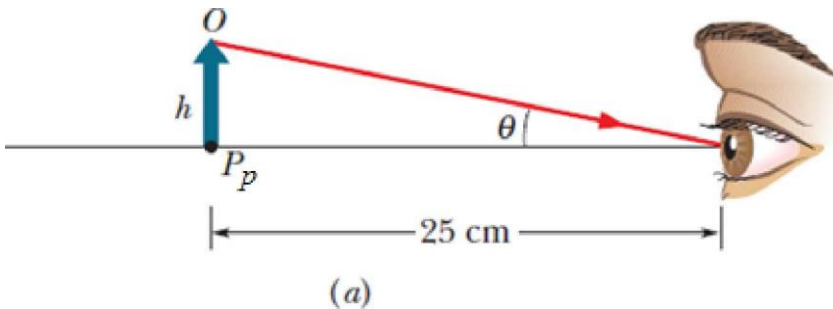
O sinal positivo confirma nossas conclusões: a imagem  $I_2$  produzida pela lente 2 é real, invertida e está do lado direito da lente 2, como mostra a figura. Sendo assim, a imagem poderia ser vista em uma tela situada 18 cm à direita da lente 2.



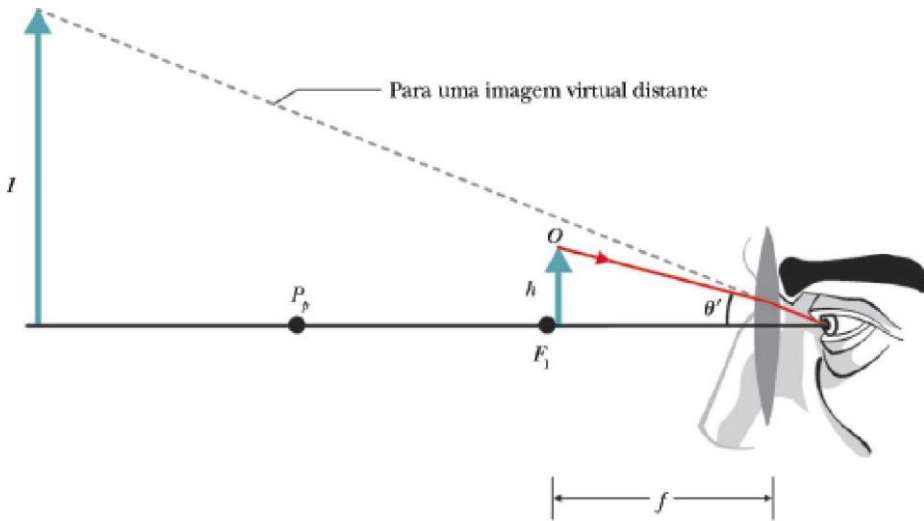
# Instrumentos Óticos: Lente de Aumento Simples

O olho humano normal só é capaz de focalizar uma imagem de um objeto na retina (situada no fundo do olho) se a distancia entre o objeto e o olho for maior que a de um ponto conhecido como *ponto próximo*, representado pelo símbolo  $P_p$ . Quando o objeto está a uma distancia menor que a do ponto próximo, a imagem na retina não é nítida.

A figura mostra um objeto  $O$  colocado no ponto próximo  $P_p$  de um olho humano. O tamanho da imagem produzida na retina depende do ângulo  $\theta$  que o objeto ocupa no campo de visão. Aproximando o objeto do olho, como na figura (b), aumentamos o ângulo e, portanto, a capacidade de distinguir detalhes do objeto. Entretanto, como o objeto agora está a uma distância menor que o ponto próximo, não está mais *em foco*, ou seja, não pode ser visto com nitidez.



# Instrumentos Óticos: Lente de Aumento Simples



Se o objeto está a uma distância menor que o ponto próximo, é possível tornar a imagem novamente nítida observando o objeto através de uma lente convergente, posicionada de tal forma que o objeto  $O$  fique na parte interna, entre o ponto focal da lente  $F_1$  (bem próximo de  $F_1$ ), e nosso olho (figura). O que o observador enxerga nesse caso é a imagem virtual do objeto produzida pela lente.

O ângulo  $\theta'$  ocupado pela imagem virtual é maior que o maior ângulo  $\theta$  que o objeto sozinho pode ocupar e ser visto com nitidez. A *ampliação angular*  $m_\theta$  (que não deve ser confundida com a ampliação lateral  $m$ ) do objeto é dada por

$$m_\theta = \theta' / \theta$$

Supondo que o objeto  $O$  se encontra no ponto focal da lente e que os ângulos são suficientemente pequenos para que  $\text{tg } \theta \approx \theta$  e  $\text{tg } \theta' \approx \theta'$ , então considerando  $\theta \approx h/25$  cm (sendo 25 cm a distância ao  $P_p$  que varia de pessoa para pessoa) e  $\theta' \approx h/f$  temos neste caso:

$$m_\theta \approx \frac{25 \text{ cm}}{f} \quad (\text{lente de aumento simples})$$

# Instrumentos Óticos: Microscópio Composto

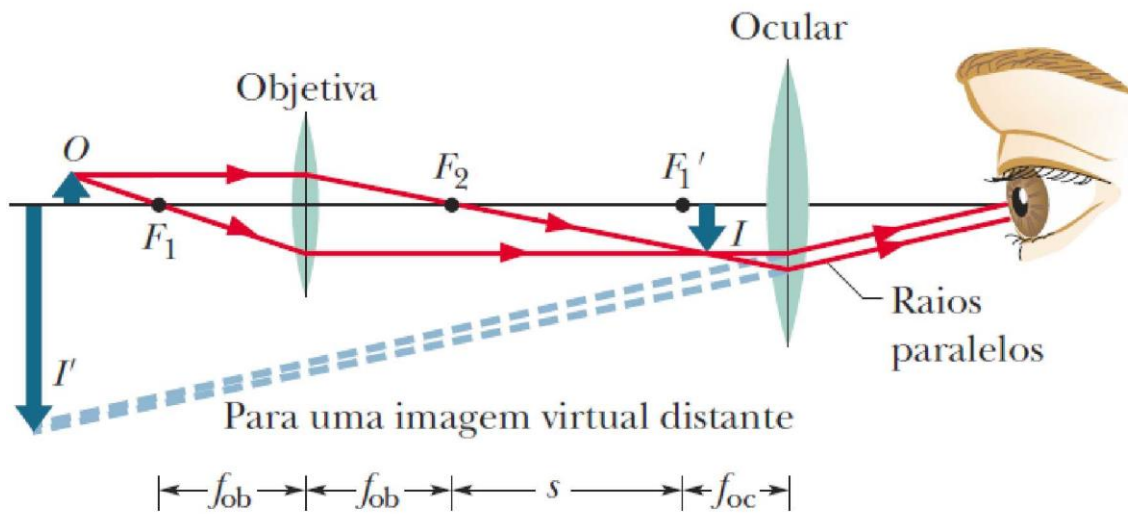


Diagrama esquemático de um microscópio composto (o desenho não está em escala). A objetiva produz uma imagem real  $I$  do objeto  $O$  ligeiramente mais próxima da ocular que o ponto focal  $F_1'$ . A imagem  $I$  se comporta como um objeto para a ocular, que produz uma imagem final virtual  $I'$ , vista pelo observador. A objetiva tem uma distância focal  $f_{ob}$ ; a ocular tem uma distância focal  $f_{oc}$  e  $s$  é o comprimento do tubo.

Se a ampliação lateral produzida pela objetiva é  $m$  e a ampliação total do microscópio é  $M$ , temos:

$$m = -\frac{i}{p} = -\frac{s}{f_{ob}}$$

$$M = mm_{\theta} = -\frac{s}{f_{ob}} \frac{25 \text{ cm}}{f_{oc}} \quad (\text{microscópio})$$

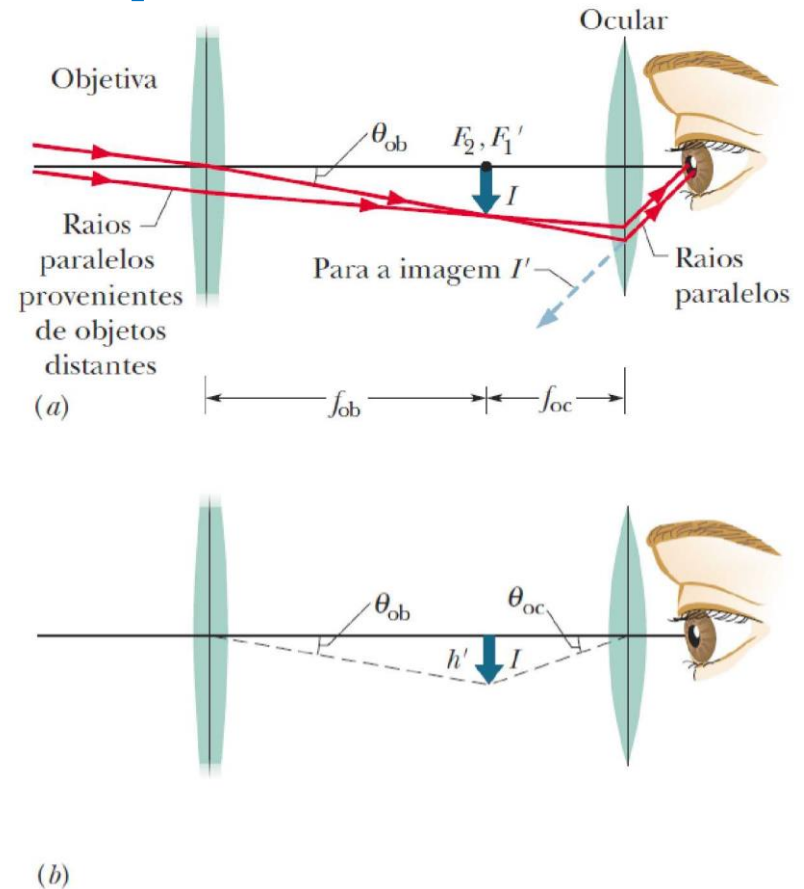


# Instrumentos Óticos: Telescópio Refrator

Diagrama esquemático de um telescópio refrator. A objetiva produz uma imagem real  $I$  de uma fonte luminosa distante (o objeto), cujos raios chegam aproximadamente paralelos à objetiva. (Na figura, uma das extremidades do objeto esta no eixo central).

(a) A imagem  $I$ , que se forma no local onde estão os pontos focais  $F_2$  e  $F_1'$  se comporta como um objeto para a ocular, que produz uma imagem final virtual  $I'$  a uma grande distancia do observador. A objetiva tem uma distância focal  $f_{ob}$ ; a ocular tem uma distância focal  $f_{oc}$ .

(b) A imagem  $I$  tem uma altura  $h'$  e ocupa um angulo  $\theta_{ob}$  do ponto de vista da objetiva e um angulo  $\theta_{oc}$  do ponto de vista da ocular.



A ampliação angular  $m_\theta$  do telescópio é  $\theta_{oc}/\theta_{ob}$ . De acordo com a figura, no caso de raios próximos ao eixo central (paraaxiais), podemos supor que  $\theta_{ob} \sim h'/f_{ob}$  e  $\theta_{oc} \sim -h'/f_{oc}$ , o que dá

$$m_\theta = -\frac{f_{ob}}{f_{oc}} \quad (\text{telescópio})$$

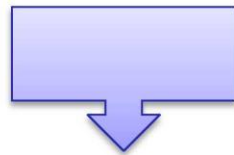
# Três Deduções: Fórmula dos espelhos esféricos

$$\beta = \alpha + \theta \quad \text{e} \quad \gamma = \alpha + 2\theta$$

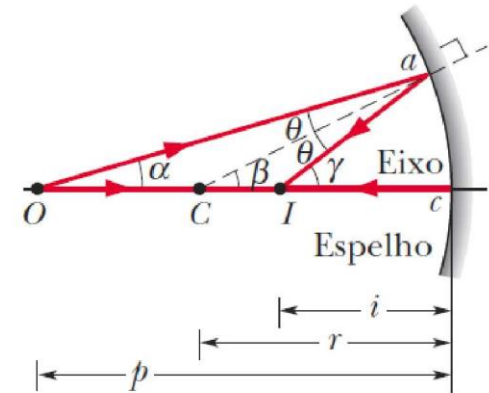
$$\alpha + \gamma = 2\beta$$

$$\alpha \approx \frac{\widehat{ac}}{cO} = \frac{\widehat{ac}}{p} \quad \beta = \frac{\widehat{ac}}{cC} = \frac{\widehat{ac}}{r}$$

$$\gamma \approx \frac{\widehat{ac}}{cI} = \frac{\widehat{ac}}{i}$$

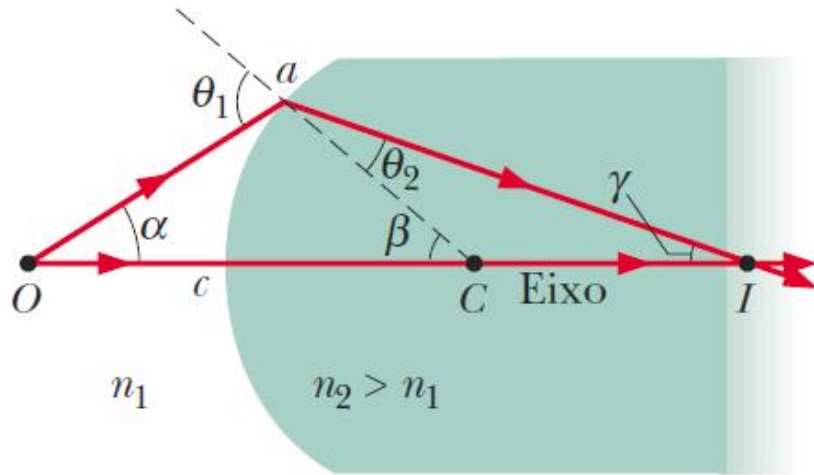


$$\frac{1}{p} + \frac{1}{i} = \frac{1}{f} \quad (\text{espelho esférico})$$



Um espelho esférico côncavo forma uma imagem pontual real  $I$  refletindo os raios luminosos provenientes de um objeto pontual  $O$ .

# Três Deduções: Superfície refratora esférica



$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$

$$n_1 \theta_1 \approx n_2 \theta_2$$

$$\theta_1 = \alpha + \beta \quad \text{e} \quad \beta = \theta_2 + \gamma$$

$$n_1 \alpha + n_2 \gamma = (n_2 - n_1) \beta$$

$$\alpha \approx \frac{\widehat{ac}}{p}; \quad \beta = \frac{\widehat{ac}}{r}; \quad \gamma \approx \frac{\widehat{ac}}{i}$$

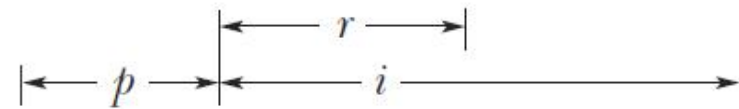
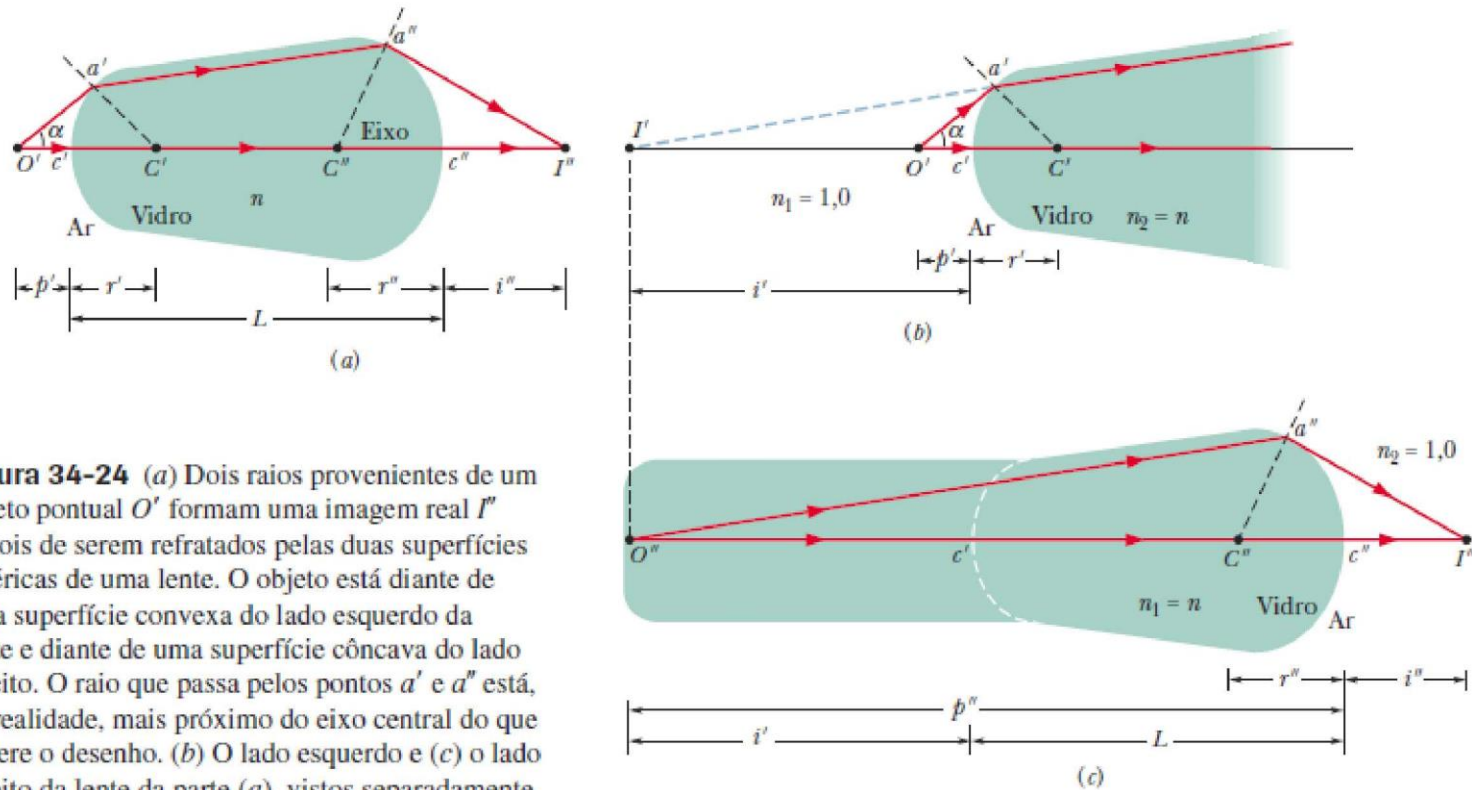


Imagem pontual real

$I$  de um objeto pontual  $O$  formada por refração em uma interface esférica convexa.

$$\frac{n_1}{p} + \frac{n_2}{i} = \frac{n_2 - n_1}{r}$$

# Três Deduções: Formula das Lentes Delgadas



**Figura 34-24** (a) Dois raios provenientes de um objeto pontual  $O'$  formam uma imagem real  $I''$  depois de serem refratados pelas duas superfícies esféricas de uma lente. O objeto está diante de uma superfície convexa do lado esquerdo da lente e diante de uma superfície côncava do lado direito. O raio que passa pelos pontos  $a'$  e  $a''$  está, na realidade, mais próximo do eixo central do que sugere o desenho. (b) O lado esquerdo e (c) o lado direito da lente da parte (a), vistos separadamente.

$$\frac{n_1}{p} + \frac{n_2}{i} = \frac{n_2 - n_1}{r} \quad + \quad \frac{1}{p'} - \frac{n}{i'} = \frac{n - 1}{r'} \quad + \quad p'' = i' + L$$

$$\frac{n}{i' + L} + \frac{1}{i''} = \frac{1 - n}{r''} \quad + \quad \frac{n}{i'} + \frac{1}{i''} = -\frac{n - 1}{r''} \quad + \quad \frac{1}{p'} + \frac{1}{i''} = (n - 1) \left( \frac{1}{r'} - \frac{1}{r''} \right)$$



$$\frac{1}{p} + \frac{1}{i} = (n - 1) \left( \frac{1}{r'} - \frac{1}{r''} \right)$$

# *Principio de Fermat do menor tempo*

No desenvolvimento do conhecimento, queremos mais que uma fórmula.

Primeiro observamos, depois obtemos números (medimos), depois obtemos uma lei que permite achar estes números, mas.....

**a verdadeira gloria da ciência é encontrar um meio de pensar de forma que a lei seja evidente**

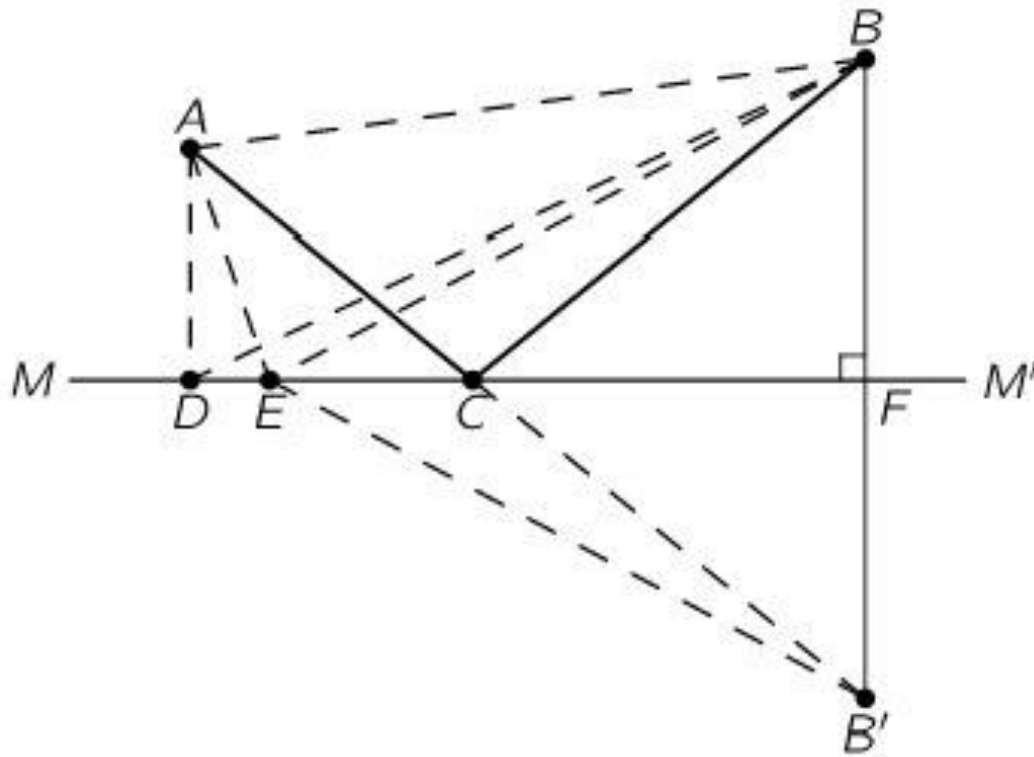
O primeiro a propor uma forma de pensar que tornou a lei da refração evidente foi Fermat em 1650 e foi chamado “*o princípio do tempo mínimo*”

Historicamente, o primeiro a propor algo semelhante foi Heron de Alexandria (geômetra grego) nascido em 10 AC. Ele propus “o principio da menor distância” para explicar a propagação da luz (nada mal! explica a propagação e a lei da reflexão 2000 anos atrás!)

Vejamos como funcionava esse princípio de Heron....

# Princípio de Fermat do menor tempo

Se aceitamos que a linha reta é a menor distância entre dois pontos, então a lei da reflexão decorre do princípio de Heron imediatamente:



Mas este princípio evidentemente não se aplica à refração!

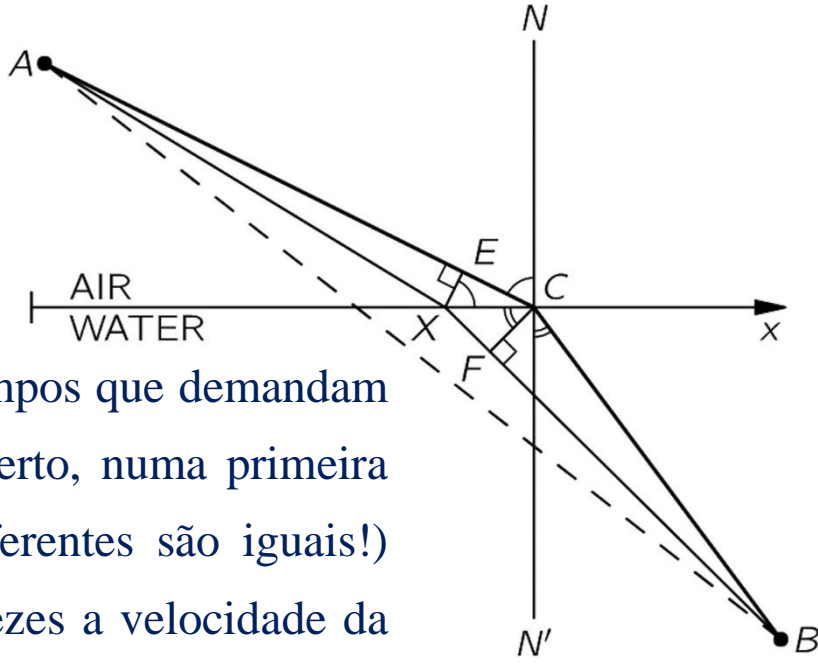
Vamos demonstrar que o “*o princípio do tempo mínimo*” é mais poderoso e conduz à Lei de Snell (Feynman Lectures on physics, volume 1, página 26-4).

# Princípio de Fermat do menor tempo

Nosso problema é ir de A até B no menor tempo!

Imagine uma pessoa se afogando e você tentando socorrer (correndo e nadando), iria por uma linha reta?

....provavelmente!.....e estaria errado!



A questão é comparar as distâncias EC e XF com os tempos que demandam para serem percorridas... (quando estamos no trajeto certo, numa primeira aproximação, os tempos para caminhos levemente diferentes são iguais!) consideramos que a velocidade da luz na água é 1/n vezes a velocidade da luz no ar, então:

$$t_{EC} = t_{XF}$$

$$\frac{EC}{v_{EC}} = \frac{XF}{v_{XF}}$$

$$\frac{EC}{v_{EC}} = \frac{XF}{\frac{v_{EC}}{n}}$$

$$EC = n XF$$

$$XC \widehat{EXC} = n XC \widehat{XCF}$$

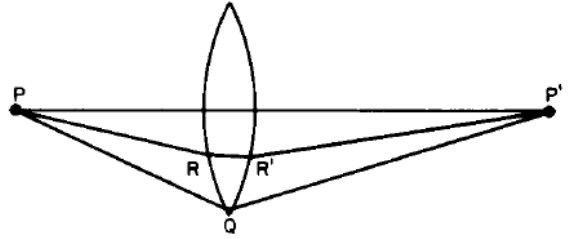
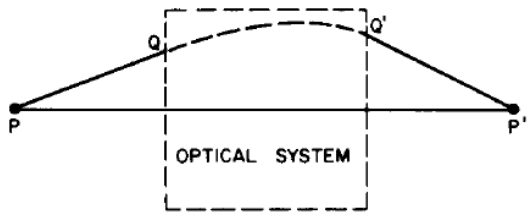
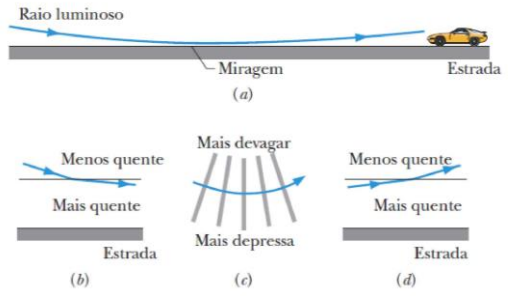
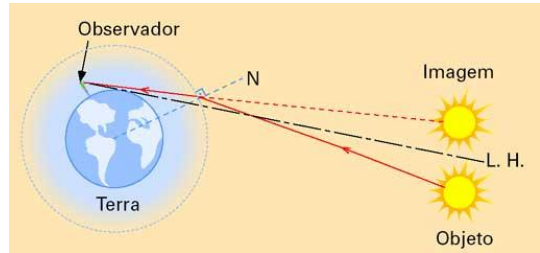
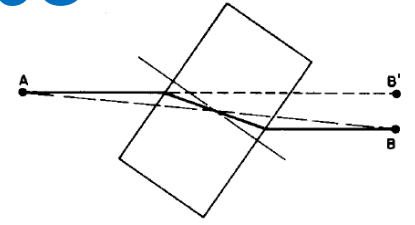
$$\sin \phi_i = n \sin \phi_r$$

Vejamos as consequências deste principio....

# Princípio de Fermat do menor tempo

Consequências:

1. Princípio da reciprocidade ( $A \rightarrow B = B \rightarrow A$ )
  2. Comportamento no bloco (diminui o trajeto dentro do bloco)
  3. Ao ver o pôr do sol ele já está bem abaixo do horizonte!
  4. Água no asfalto?
  5. Como fazer para coletar toda a luz que sai de um ponto P Mesmo a que vai para Q?
- solução: igualando os tempos de todos os diferentes caminhos de P a P' !!! = lente convergente

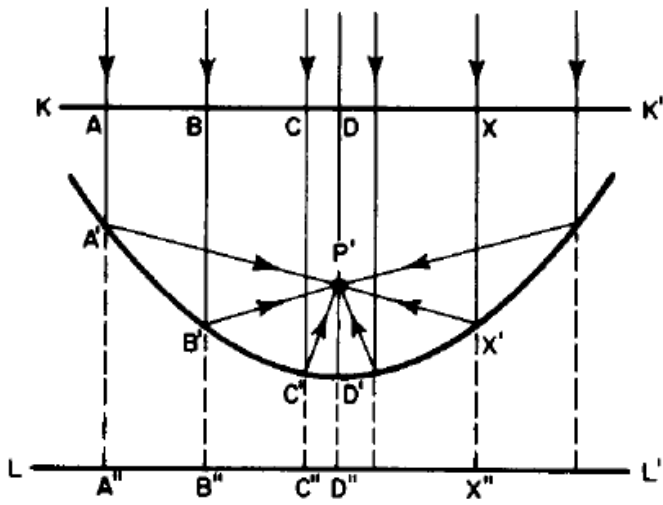
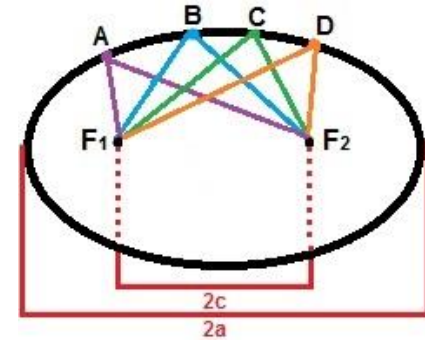




# Princípio de Fermat do menor tempo

Consequências:

6. Vejamos o que acontece com uma fonte luminosa no foco de uma elipse
7. O telescópio do Palomar (São Diego - Califórnia) utiliza esta propriedade, mas a curva que iguala os caminhos é uma parábola!



# Um parênteses para reflexão

Quando um novo princípio teórico é desenvolvido, como o dos tempos mínimos, os estudantes estão inclinados a dizer: “bem..., é simples, elegante, surpreendente, etc...mas a questão é se, no final das contas, ele nos ajuda a entender a física...veja... eu entendo espelhos seguindo a Lei de Snell e da igualdade dos ângulos de incidência e reflexão sem me importar com esses princípios”...parece que é uma questão filosófica....mas:

**a importância de um princípio é que ele predize coisas novas!!! ...nos permite ir além do que atualmente conhecemos !!!**

Por exemplo:

O princípio de Fermat prediz que a velocidade da luz em água deve ser inferior à velocidade da luz no ar (o que não pode ser obtido da lei de Snell!)

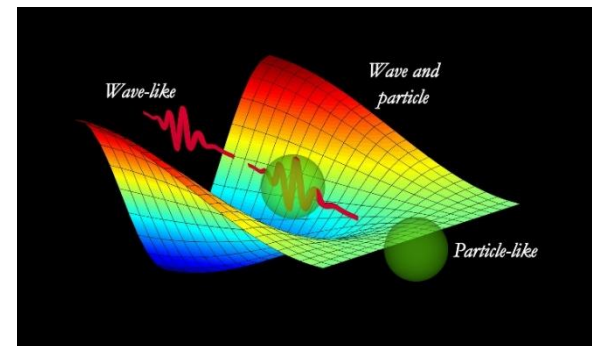
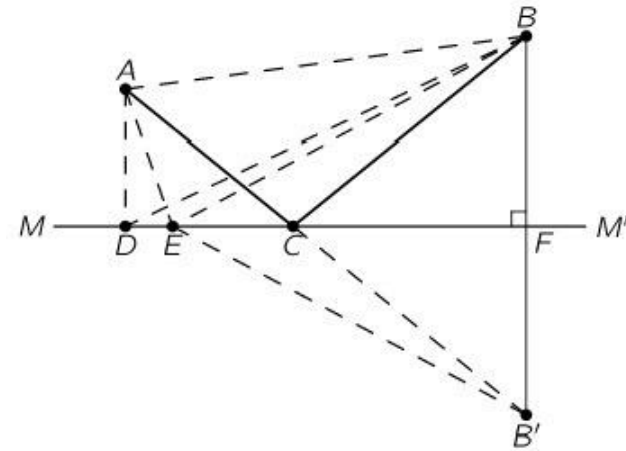
# Corrigindo a definição do princípio de Fermat

Até aqui, utilizamos uma definição incorreta do princípio do “menor tempo”. Para ir de A até B o menor tempo não é por C!!!

O correto é dizer que deve ser um **mínimo**, ou seja: a luz indo por um caminho particular, se fazemos uma pequena modificação do caminho, não haverá mudanças de primeira ordem no tempo (somente de segunda ordem).

Este princípio diz que **a luz checa antes** o caminho pelo qual deve ir!!! (diferente da lei de Snell que preserva a causalidade ...sequencia de eventos!!!). Assim, alguns argumentam que com a lei de Snell entendemos a luz, mas com este princípio não!!!

A resposta é que **a luz checa sim, os caminhos** antes de seguir por eles, de forma não local!!! (o que estudaremos na mecânica quântica, onde veremos que a luz fareja os caminhos numa distância de aproximadamente seu comprimento de onda)



# Questionário

1. Quais as aproximações consideradas na óptica geométrica e quais os princípios básicos?
2. Qual o principal fundamento de Huygens a favor da teoria ondulatória da luz?
3. Postule o Princípio de Fermat e obtenha a Lei de Snell a partir dele.
4. Defina e explique a importância do último processo do método científico (observar, medir, obter a lei e .....)
5. Quais as diferenças entre o Princípio de Heron e o de Fermat
6. Deduza a fórmula das lentes delgadas, das superfícies refratoras esféricas e do espelho esférico
7. Explique como construir um microscópio e um telescópio. Identifique as diferenças construtivas (que fazem a seu funcionamento). Responda à questão: porque não funcionaria se trocamos os instrumentos (microscópio para ver estrelas e telescópio para ver vírus)?
8. Resolva problemas simples do Halliday de aplicação das fórmulas dos espelhos e das combinações de lentes (localização de imagens, aumento lateral e magnificação)