

versão preliminar

---

leituras de  
**física**

GRAF

óptica

para ver, fazer e pensar

---

**18 a 22**

18. Espelhos planos    21. As lentes esféricas  
19. Espelhos esféricos    22. Os instrumentos ópticos  
20. Defeitos da visão

Leituras de Física é uma publicação do

**GRAF - Grupo de Reelaboração do Ensino de Física  
Instituto de Física da USP**

**EQUIPE DE ELABORAÇÃO DAS LEITURAS DE FÍSICA**

Anna Cecília Copelli  
Carlos Toscano  
Dorival Rodrigues Teixeira  
Isilda Sampaio Silva  
Jairo Alves Pereira  
João Martins  
Luís Carlos de Menezes (coordenador)  
Luís Paulo de Carvalho Piassi  
Suely Baldin Pelaes  
Wilton da Silva Dias  
Yassuko Hosoume (coordenadora)

**ILUSTRAÇÕES:**

Fernando Chuí de Menezes  
Mário Kano

**GRAF - Instituto de Física da USP  
rua do Matão, travessa R, 187  
Edifício Principal, Ala 2, sala 305  
05508-900 São Paulo - SP  
fone: (011) 818-7011 fax:(011) 818-7057**

financiamento e apoio:

Convênio USP/MEC-FNDE

Sub-programa de educação para as Ciências (CAPES-MEC)

FAPESP / MEC - Programa Pró-Ciência

Secretaria da Educação do Estado de São Paulo - CENP

**A reprodução deste material é permitida, desde que observadas as seguintes condições:**

- 1. Esta página deve estar presente em todas as cópias impressas ou eletrônicas.**
- 2. Nenhuma alteração, exclusão ou acréscimo de qualquer espécie podem ser efetuados no material.**
- 3. As cópias impressas ou eletrônicas não podem ser utilizadas com fins comerciais de qualquer espécie.**

**junho de 1998**

# 18

## Espelhos planos

Agora vamos começar a estudar a Óptica Geométrica

### OS PRINCÍPIOS DA ÓPTICA GEOMÉTRICA

Para construirmos as imagens formadas em espelhos planos, precisamos conhecer três regras.

A primeira delas você já viu, quando montou sua câmara escura. A imagem se formou no papel vegetal porque a luz se propagou através do orifício em linha reta. A sombra de um objeto se forma porque a luz tangencia as extremidades dele, evitando que a luz faça uma curva para iluminar do outro lado. Os eclipses do sol e da lua também ocorrem devido a este fato, que pode ser enunciado assim:

**1° Em um meio homogêneo e isotrópico, a luz se propaga em linha reta.**

Quando você vai em espetáculos de *rock*, deve ter reparado (claro, naquele silêncio, você fica tão concentrado que percebe tudo que acontece ao redor) que a luz de um holofote não muda o caminho da luz de outro holofote. Ou quando duas lanternas são acesas, o fecho de uma lanterna não interfere no outro. Para facilitar, os físicos costumam chamar a trajetória percorrida pela luz de raio de luz:

**2° Quando dois ou mais raios de luz se cruzam, seguem sua trajetória, como se os outros não existissem.**

Também deve ter observado, que quando olha alguém pelo espelho, está pessoa também o vê. Isto só acontece porque os raios de luz são reversíveis, isto é, tanto podem fazer o percurso você-espelho-alguém, como alguém-espelho-você:

**3° A trajetória da luz independe do sentido do percurso.**

**Atividade 1:** olhe para um espelho, de preferência grande.

Como aparece sua imagem?

Levante o braço esquerdo. Que braço a sua imagem levantou?

Compare esta imagem com a que você viu na câmara escura. Quais as semelhanças e diferenças?

Por que acontecem estas semelhanças e diferenças?

**Atividade 2:** fique em frente de um espelho. Agora afaste-se um passo.

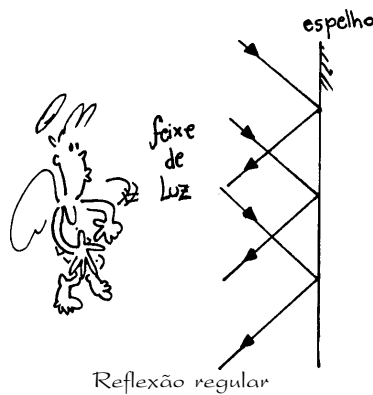
O que aconteceu com o tamanho da sua imagem?

O que aconteceu com o tamanho dos objetos que estão atrás de você?

Imagine que você saia correndo - de costas para continuar olhando sua imagem. O que aconteceria com sua imagem?

A que velocidade ela se afasta de você? E do espelho?

## Refletindo

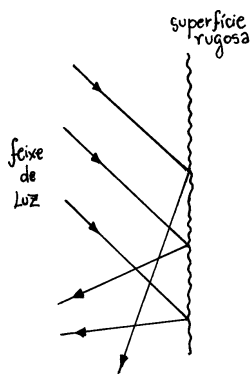


Reflexão regular

Por que, quando olhamos para um espelho, para uma superfície tranqüila de água, para um metal polido ou nos olhos da(o) amada(o), vemos nossa imagem refletida e, quando olhamos para outras coisas, vemos essas coisas e não a nossa imagem?

Quando a superfície refletora é bem plana e polida, a luz incidente muda de direção, mas se mantém ordenada. Isto, que acontece quando vemos nossa imagem refletida, é chamado *reflexão regular*.

Quando a superfície é irregular, rugosa, a luz volta de maneira desordenada; então temos uma reflexão difusa. Neste caso, em vez de vermos nossa imagem, vemos o objeto.



Reflexão difusa

## O tamanho da imagem

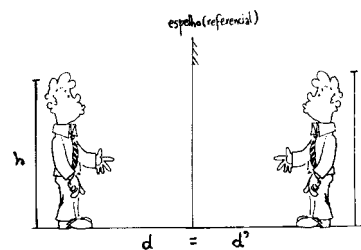
Quando você era criança e leu "Alice no País dos Espelhos" ficou pensando na possibilidade de "entrar em um espelho". Vários filmes de terror tratam deste tema: os espelhos estão sempre ligados a outras dimensões, "mundos paralelos", ao mundo da magia. Pergunta: onde se forma a imagem?

Na câmara escura, a imagem da chama da vela formava-se no papel vegetal. Você poderia aproximar ou afastar o papel vegetal para focalizar a imagem. No caso de um espelho plano, é impossível captar uma imagem em um anteparo. Dizemos que esta é uma **imagem virtual**.

Uma imagem é virtual quando dá a impressão de estar "atrás" do espelho. Uma criança quando engatinha ou um cachorrinho, vão procurar o companheiro atrás do espelho.

E a distância da imagem? Primeiro devemos escolher um referencial, que não deve ser o observador, pois este pode mudar de lugar. Utilizamos o próprio espelho como referencial. Assim, a distância da imagem ao espelho é igual à distância do objeto ao espelho.

$$d_o = d_i$$



Quando você levanta seu braço direito, a imagem levanta o braço esquerdo?

Se você estiver olhando sua própria imagem, você será o objeto e o observador, mas na maioria das vezes o objeto e o observador são personagens distintos.

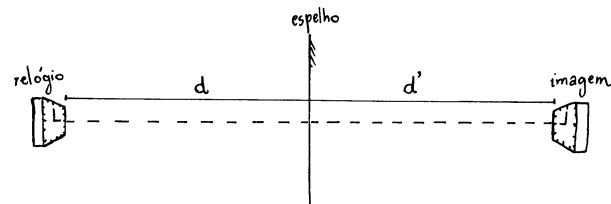
Uma vez definido o referencial, o tamanho da imagem é sempre igual ao tamanho do objeto. É como se objeto e imagem estivessem equidistantes do espelho.

$$o = i$$

## Representação da Imagem

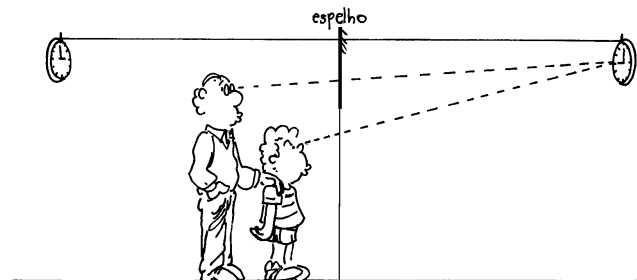
Com estas informações é fácil representar a imagem de qualquer objeto. Basta traçar uma perpendicular ao espelho, passando pelo objeto, um relógio na parede oposta, por exemplo, e manter as distâncias iguais.

Se a posição do objeto não mudar, a posição da imagem também permanecerá a mesma. Enxergar ou não o relógio dependerá da posição do observador.



A distância do relógio ao espelho é igual à distância da imagem ao espelho

Para saber se ele enxergará, traçamos uma reta unindo os olhos à imagem. Se esta reta passar pelo espelho ele enxergará o relógio.



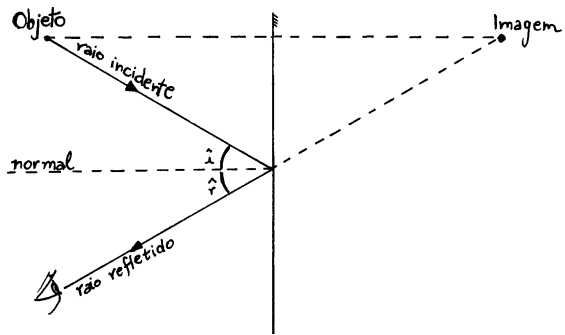
O adulto e a criança enxergarão a imagem do relógio?

## As Leis da Reflexão

Vamos observar com atenção a última figura, traçando uma linha perpendicular ao espelho, que chamaremos **reta normal**. Através dela, definimos o ângulo de incidência e o ângulo de reflexão, e as duas leis da reflexão:

**1º O raio incidente, a reta normal e o raio refletido estão situados em um mesmo plano.**

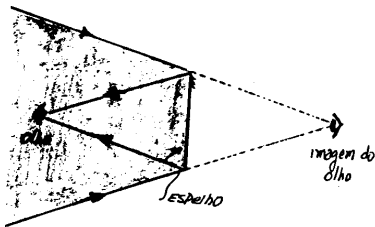
**2º O ângulo de incidência é igual ao ângulo de reflexão.**



O observador vê a imagem como se ela estivesse atrás do espelho, no prolongamento do raio refletido

### Campo visual de um espelho plano

Se você estiver olhando para um espelho, imagine que você é a própria imagem, isto é, alguém que olha por trás do espelho. Deste ponto, as duas linhas que tangenciam as extremidades do espelho delimitam o campo visual do espelho.



Tudo que estiver na área sombreada será visto pelo observador

## Construção de um periscópio

Periscópios são instrumentos ópticos utilizados em submarinos para observar o que se passa fora deles. Você irá construir um ou dois periscópios, dependendo do material que utilize. O material utilizado será:

- dois pedaços de espelho plano quadrados (ou retangulares);
- papel cartão preto, ou um tubo de PVC e dois cotovelos;
- outros (tesoura, cola, fita crepe,...)

A idéia é construir um tubo com os espelhos colocados um em cada extremidade.

Se você optou pela construção em papel cartão, construa dois periscópios, um para olhar para frente e outro para olhar para trás (talvez você nunca tenha visto um; aí está a novidade).

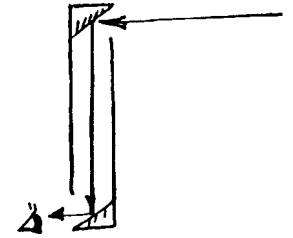
Se optou pelo PVC, basta um, porque você pode girar o cotovelo e olhar para frente, para trás, ou para o lado.

Antes da construção você deve planejar: conforme o tamanho dos espelhos, deve projetar a largura do tubo (se for de papel) e o ângulo em que os espelhos devem ficar.

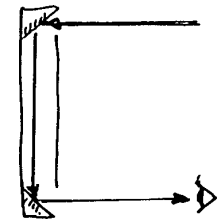
Depois de pronto - e antes de entregar para seu irmãozinho estraçalhá-lo - observe as imagens que vê.

Por que elas aparecem assim? Estão invertidas? Quando apontamos o periscópio para a frente a imagem formada é igual à que vemos quando apontamos para trás?

Utilize figuras com raios de luz para ajudá-lo a explicar como as imagens se formaram.



Periscópio para olhar para a frente



Periscópio para olhar para a trás

## Imagens formadas por dois espelhos planos

a) Junte dois espelhos planos com fita crepe, formando um ângulo de  $90^\circ$ . Coloque um pequeno objeto entre eles e verifique o número de imagens formadas.

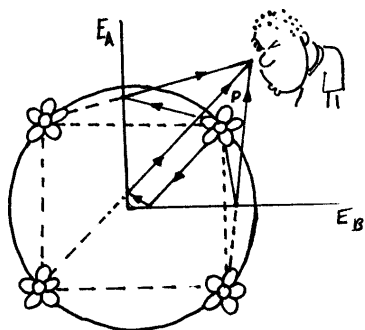
b) Diminua o ângulo entre os espelhos e verifique o que ocorre com as imagens.

c) Retire a fita que une os espelhos, mantendo-os paralelos e um em frente ao outro. Coloque o objeto entre eles e verifique o número de imagens formadas.

Quando colocamos um objeto entre dois espelhos que formam um ângulo de  $90^\circ$  entre si, observamos a formação de três imagens.

Você precisará de dois espelhos planos (de 15cm por 15cm, por exemplo) e fita crepe.

Quando o ângulo é reto, formam-se três imagens



As imagens  $I_1$  e  $I_2$ , "vistas" nos espelhos  $E_1$  e  $E_2$ , são interpretadas como objetos pelos espelhos  $E_2$  e  $E_1$ , respectivamente, e produzem as imagens  $I_3$  e  $I_4$ , que coincidem, correspondendo à terceira imagem vista.

Se diminuirmos o ângulo entre os espelhos, o número de imagens formadas aumenta, atingindo seu limite na situação em que os espelhos são colocados paralelos entre si ( $\alpha = 0^\circ$ ). Nesse caso, teoricamente, deveriam se formar infinitas imagens do objeto, o que, na prática, não se verifica, pois a luz vai perdendo intensidade à medida que sofre sucessivas reflexões.

O número (N) de imagens produzidas por dois espelhos pode ser determinado algebricamente (quando se conhece o ângulo  $\alpha$  entre eles) através da expressão:

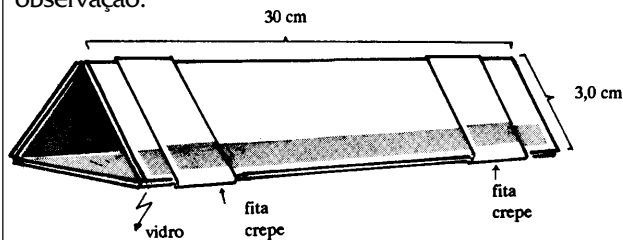
$$N = \frac{360^\circ}{\alpha} - 1$$

**Observação:** esta equação é válida quando a relação  $360/\alpha$  for um número par. Quando a relação for um número ímpar, a expressão é válida apenas se o objeto se localizar no plano bissetor do ângulo  $\alpha$ .

### Construção de um caleidoscópio

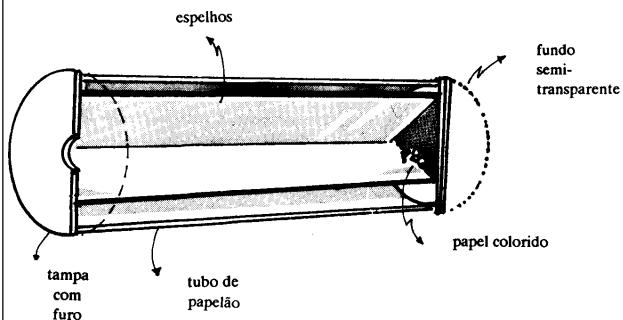
Você precisará de: três espelhos planos, cada um deles com cerca de 30 cm por 3 cm, papelão, papel semitransparente (vegetal, por exemplo), pedaços de papel colorido ou de canudos de refrigerante, tesoura e fita crepe.

Montagem: prenda com fita crepe os três espelhos, mantendo a parte espelhada voltada para dentro. Para melhorar, fixe a montagem dos espelhos em um tubo de papelão, onde se faz uma abertura para a observação.



Na outra extremidade faça uma tampa com dois pedaços de papel semitransparente, colocando entre eles alguns pedaços de papel colorido (celofane) ou de canudinhos.

Observe as imagens formadas quando os pedaços de papel se movimentam.



### Questões

1) A função principal da tela do cinema é refletir a luz que vem do projetor. Então, a tela de tecido pode ser substituída por um espelho? Justifique.

2) Uma pessoa deseja colocar na parede de seu quarto um espelho plano, cuja altura seja tal que ela consiga observar sua imagem por inteiro. Para que isso seja possível, qual deve ser:

- a altura mínima do espelho;
- a distância a que o espelho deve ser colocado em relação ao chão;
- a distância a que a pessoa deve se situar em relação ao espelho.

3) Você calculou que, para que uma pessoa veja a sua imagem inteira num espelho plano é necessário que o espelho seja de um tamanho igual à metade da altura da pessoa.

Se o espelho retrovisor de um automóvel fosse plano, este deveria ter a metade da altura do veículo que dele se aproximasse, para que sua imagem fosse vista por inteiro?

# 19

## Espelhos esféricos

Usados em entrada de elevador e de estacionamento, saída de ônibus, estojo de maquiagem e em retrovisores.

Uma das características de um espelho plano, é que ele não "distorce" a imagem. Quando desejamos aumentar ou diminuir a imagem, invertê-la de ponta-cabeça ou direita-esquerda, usamos um espelho esférico.

Por esta razão é que são usados espelhos esféricos nas salas de espelhos dos parques de diversão: sua função é tornar a pessoa maior/menor, mais gorda/magra,...

**Atividade 1:** Fique em frente de um espelho desses próximos à porta de elevadores ou da porta de saída de um ônibus. Comparando com um espelho plano, responda as questões:

- O tamanho da imagem é maior ou menor?
- O campo visual aumentou ou diminuiu?
- Vá se afastando deste espelho. O que acontece com a imagem?
- Porque nestas situações, como também em alguns retrovisores de motocicletas e de automóveis, são usados espelhos esféricos e não espelhos planos?

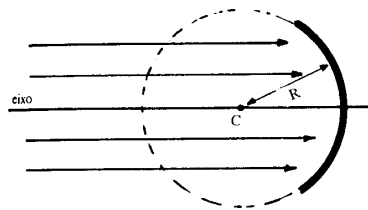
**Atividade 2:** Pegue o estojo de maquiagem de sua mãe. Normalmente nestes estojos existem espelhos esféricos. Comparando com um espelho plano, responda as questões:

- O tamanho da imagem é maior ou menor?
- O campo visual aumentou ou diminuiu?
- Vá se afastando deste espelho. O que acontece com a imagem?
- Porque nestas situações, como também nos espelhos de dentistas, são usados espelhos esféricos e não espelhos planos?

Compare as respostas das duas atividades. Quais suas semelhanças e diferenças?

Podemos afirmar que os espelhos de porta de elevador e maquiagem são os mesmos? Justifique.

Os refletores de lanterna, de faróis de automóveis e de refletores podem ser considerados espelhos esféricos?



Espelho côncavo

Os espelhos esféricos são constituídos de uma superfície lisa e polida com formato esférico.

Se a parte refletora for interna à superfície, o espelho recebe o nome de espelho **côncavo**; se for externa, é denominado **convexo**.

A imagem formada por esses espelhos não é muito nítida. Para estudarmos essas imagens recorreremos às **condições de Gauss** (1777-1855), um matemático, astrônomo e físico alemão:

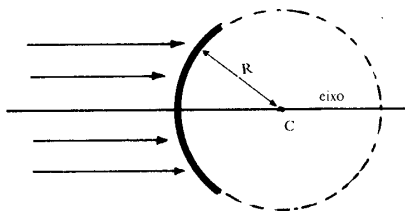
- o ângulo de abertura deve ser pequeno, no máximo  $10^\circ$

- os raios de luz incidentes devem estar próximos do eixo principal e pouco inclinados em relação a ele.

### Representação geométrica das imagens

A posição e o tamanho das imagens formadas pelos espelhos esféricos também podem ser determinados geometricamente (como nos espelhos planos) pelo comportamento dos raios de luz que partem do objeto e são refletidos após incidirem sobre o espelho.

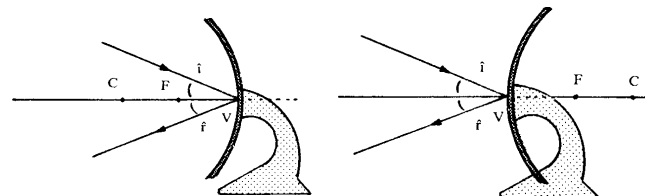
Embora sejam muitos os raios que contribuem para a formação das imagens, podemos selecionar três raios que nos auxiliam a determinar mais simplificada suas características:



Espelho convexo

1) os raios de luz que incidem no espelho passando pelo seu centro de curvatura (C) refletem-se sobre si mesmos, pois possuem incidência normal (perpendicular) à superfície;

2) quando os raios de luz incidem no vértice (V) do espelho são refletidos simetricamente em relação ao seu eixo principal ( $i = r$ );



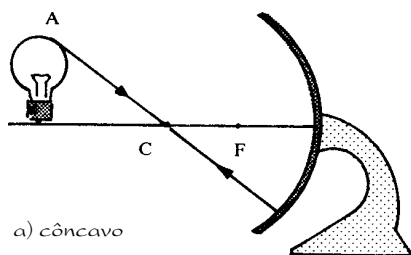
a) côncavo

b) convexo

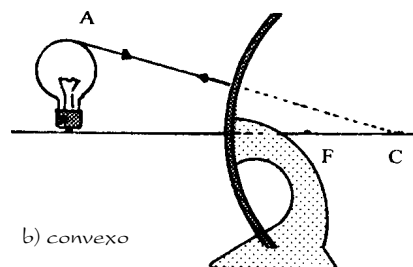
Raios de luz que incidem no vértice (V) do espelho

3) nos espelhos côncavos, os raios de luz que incidem paralelamente e próximos ao eixo principal são refletidos passando por uma região sobre o eixo denominada foco (F).

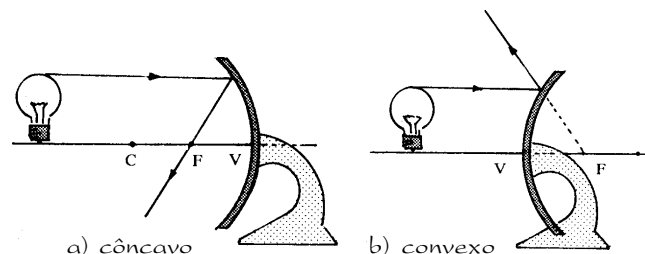
Nos espelhos convexos, os raios são desviados, afastando-se do eixo principal, de modo que a posição de seu foco é obtida pelo prolongamento desses raios.



a) côncavo



b) convexo



a) côncavo

b) convexo

Raios de luz que incidem paralelamente ao eixo principal

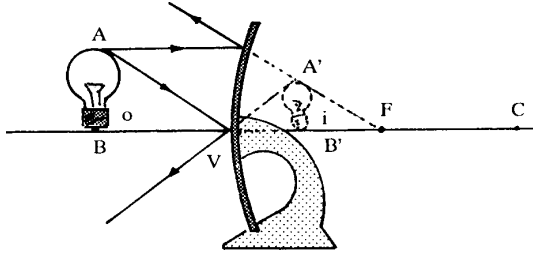
A representação geométrica das características das imagens obtidas através de espelhos esféricos pode ser efetuada, tal como nos espelhos planos, através de um diagrama, onde se traça o comportamento de pelos menos dois raios de luz que partem de um mesmo ponto do objeto.

Representação de raios de luz incidindo: (a) em espelho côncavo, passando pelo seu centro de curvatura (C); (b) incidindo no espelho convexo



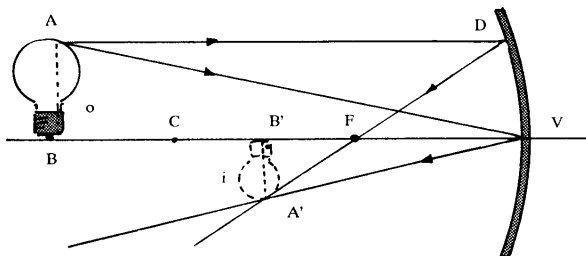
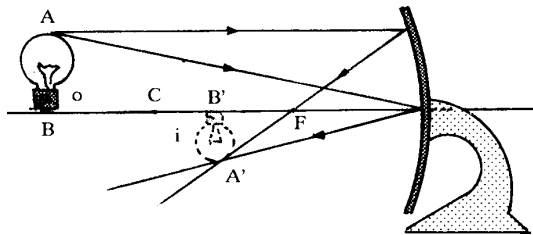
## Imagens nos espelhos convexos

No caso dos espelhos convexos, a posição e o tamanho das imagens ficam determinados pelo cruzamento do prolongamento dos raios refletidos, já que esses raios não se cruzam efetivamente.



As características das imagens obtidas através dos espelhos convexos são semelhantes, pois esses espelhos formam **imagens virtuais** (que não podem ser projetadas), **direitas** e **menores** em relação ao objeto, independentemente da posição do objeto.

Nos espelhos côncavos, entretanto, as imagens formadas possuem características distintas, dependendo da posição do objeto em relação ao espelho.



## As equações dos espelhos esféricos

Vamos considerar: **o** - altura do objeto;

**i** - altura da imagem;

**d<sub>o</sub>** - distância do objeto ao vértice;

**d<sub>i</sub>** - distância da imagem ao vértice;

**f** - distância focal ( $f = R/2$ ).

A relação entre o tamanho da imagem **i** e o tamanho do objeto **o** é denominada **aumento A** ou **ampliação** fornecido pelo espelho:

$$A = \frac{i}{o}$$

Pela semelhança entre os triângulos ABV e A'B'V (dois triângulos retângulos com ângulos congruentes) podemos escrever a equação do aumento:

$$\frac{i}{o} = \frac{d_i}{d_o}$$

E pela semelhança entre os triângulos VDF e A'B'F, podemos deduzir:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{d_o} + \frac{1}{d_i}$$

A equação do aumento e esta última são válidas para espelhos côncavos e convexos, imagens reais ou virtuais, desde que sejam consideradas as convenções:

**a) a distância d<sub>o</sub> (ou d) será positiva se o objeto (ou a imagem) for real, e negativa se for virtual;**

**b) a distância focal será positiva quando o espelho for côncavo, e negativa quando for convexo;**

**c) na equação do aumento é considerado sempre o módulo das distâncias envolvidas.**

## Questões

1) Coloque uma vela na frente de um espelho côncavo. Analise como e onde ocorre a formação da imagem quando a vela estiver:

- a) antes do centro de curvatura (C);
- b) no centro de curvatura;
- c) entre o centro e o foco(F);
- d) no foco;
- e) entre o foco e o vértice (V).

Faça esquemas para esta análise.

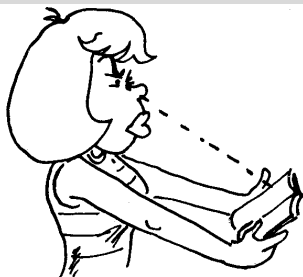
2) A maioria dos espelhos retrovisores usados em motos são convexos.

- a) Que tipo de imagem eles formam?
- b) Qual a vantagem em se usar esse espelho?
- c) Qual a distância focal de um espelho que fornece uma imagem distante 8m do objeto, quando este está a 6cm do espelho?
- d) Qual o aumento dessa imagem?

# 20

## Defeitos da visão

Que tipo de lente um míope deve usar?  
É um hipermetrópe?  
O que é "vista cansada"?



## O Nome da Rosa

*"Guilherme enfiou as mãos no hábito, onde este se abria no peito formando uma espécie de sacola, e de lá tirou um objeto que já vira em suas mãos e no rosto, no curso da viagem. Era uma forquilha, construída de modo a poder ficar sobre o nariz de um homem (e melhor ainda sobre o dele, tão proeminente e aquilino), como um cavaleiro na garupa de seu cavalo ou como um pássaro num tripé. E dos dois lados da forquilha, de modo a corresponder aos olhos, expandiam-se dois círculos ovais de metal, que encerravam duas amêndoas de vidro grossas como fundo de garrafa.*

*Com aquilo nos olhos, Guilherme lia, de preferência, e dizia que enxergava melhor do que a natureza o havia dotado, ou do que sua idade avançada, especialmente quando declinava a luz do dia, lhe permitia. Nem lhe serviam para ver de longe, que para isso tinha os olhos penetrantes, mas para ver de perto. Com aquilo ele podia ler manuscritos inscritos em letras bem finas, que até eu custava a decifrar. Explicara-me que, passando o homem da metade de sua vida, mesmo que sua vista tivesse sido sempre ótima, o olho se endurecia e relutava em adaptar a pupila, de modo que muitos sábios estavam mortos para a leitura e a escritura depois dos cinquenta anos.*

*Grave dano para homens que poderiam dar o melhor de sua inteligência por muitos anos ainda. Por isso devia-se dar graças a Deus que alguém tivesse descoberto e fabricado aquele instrumento. E me falava isso para sustentar as idéias de seu Roger Bacon, quando dizia que o objetivo da sabedoria era também prolongar a vida humana".*

**Umberto Eco. Rio de Janeiro: Nova Fronteira, 1983, (pág.94/95)**

O fenômeno da visão pode ser dividido em três etapas: o estímulo causado pela luz proveniente dos objetos, a sua recepção pelo olho humano, onde se forma a imagem, e a sensação de visão que corresponde ao processamento das informações transmitidas do olho para o cérebro.

Mesmo na presença de luz, uma pessoa pode não enxergar caso haja algum problema na recepção do estímulo (olho), em função de deformações congênitas, moléstias, acidentes, ou do processamento das informações (sistema neurofisiológico).

Estes casos não serão estudados, porque dizem mais respeito à biologia e à medicina.

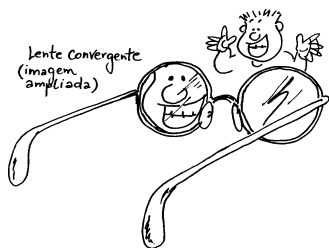
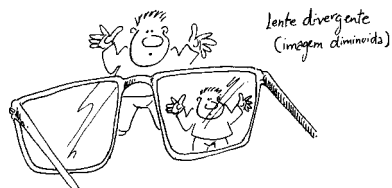
Na maior parte dos casos, os problemas associados à visão referem-se à focalização, isto é, o olho não produz imagens nítidas dos objetos ou das cenas.

Assim, é comum observarmos pessoas que aproximam os objetos dos olhos, enquanto outras procuram afastá-los, para enxergá-los nitidamente.

Os óculos e as lentes têm a função de resolver problemas associados à focalização.

## As lentes e os defeitos da visão

Podemos identificar o tipo de lente utilizada nos óculos das pessoas, e portanto o tipo de problema de visão, através de testes muito simples.



**Atividade 1:** coloque os óculos entre uma figura e o olho. A figura ficou diminuída ou ampliada?

**Atividade 2:** Observe uma figura através da lente mantida a cerca de 50 cm do olho e faça uma rotação. A figura ficou deformada?

Na primeira atividade, se a figura ficou diminuída, a lente é **divergente**, usada para corrigir **miopia**, que é a dificuldade em enxergar objetos distantes.

Se ficou ampliada, trata-se de uma lente **convergente**, utilizada para corrigir **hipermetropia** (dificuldade em enxergar objetos próximos).

Na segunda atividade, havendo deformação, a lente tem correção para **astigmatismo**, que consiste na perda de focalização em determinadas direções. Estas lentes são **cilíndricas**.

Um outro defeito de visão semelhante à hipermetropia é a **presbiopia**, que difere quanto às causas. Ela se origina das dificuldades de acomodação do cristalino, que vai se tornando mais rígido a partir dos 40 anos.

A correção desse problema é obtida pelo uso de uma lente convergente para leitura.

Assim, ou a pessoa usa dois óculos, ou óculos bifocais: a parte superior da lente é usada para a visão de objetos distantes e a parte inferior para objetos próximos.

Quando a pessoa não tem problemas em relação à visão de objetos distantes, a parte superior de suas lentes deve ser plana ou então ela deve usar óculos de meia armação.

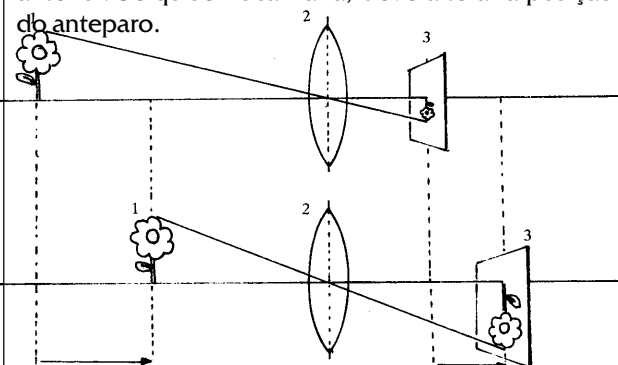
## Focalização no olho humano

Vamos fazer uma simulação para entender a formação de imagens no olho humano.

**Atividade 3:** Você precisará de uma vela, uma lente convergente, uma folha de papel, fósforo e um ambiente escuro.

A vela será o objeto iluminado; a lente convergente representará o cristalino e o papel, a retina, onde se forma a imagem.

Coloque a vela a uma grande distância da lente, encontrando uma posição para o anteparo em que a imagem é nítida. Aproxime a vela e verifique que a imagem perde nitidez para esta posição do anteparo, ou seja, a imagem não se forma na mesma posição anterior. Se quiser focalizá-la, deve alterar a posição do anteparo.



Para cada posição da vela encontramos uma posição diferente para o anteparo, em que a imagem é nítida

No olho humano, a posição do anteparo (retina) é fixa, porém a imagem está sempre focalizada. Isto acontece porque o cristalino, a lente responsável pela focalização, modifica seu formato, permitindo desvios diferenciados da luz através da alteração de sua curvatura.

Quando a distância entre a lente e o objeto é muito grande, a luz proveniente do objeto chega à lente e é desviada para uma certa posição do anteparo. A imagem estará focalizada e será vista com nitidez.

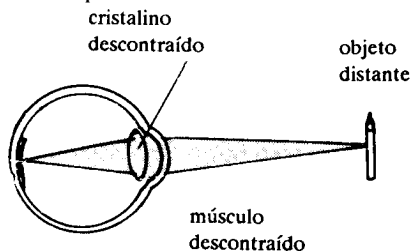
Esta posição, onde acontece a convergência da luz, é a distância focal  $f$ , uma característica da lente.

### Acomodação visual

Para pessoas sem dificuldade de visão, quando um objeto se encontra a mais de 6 metros do olho, a imagem se formará sobre a retina, sem nenhum esforço para o cristalino.

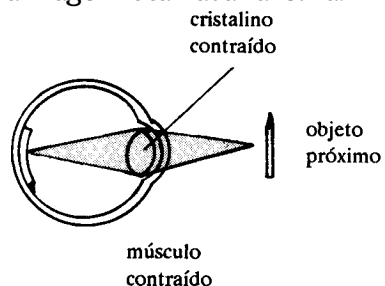
Nesta situação sua curvatura é menos acentuada, ou seja, apresenta uma forma mais plana.

Imagem obtida sem esforço do cristalino (curvatura mínima)



À medida que o objeto se aproxima do olho, o cristalino se torna mais encurvado pela ação dos músculos que o sustentam, mantendo a imagem focalizada na retina.

Imagem obtida com esforço máximo do cristalino (curvatura máxima)



Esse processo é limitado, atingindo seu limite para objetos situados a cerca de 25 cm do olho, no caso de pessoas com visão normal. Isto é chamado acomodação visual.

Na prática a acomodação do cristalino ocorre dentro de um intervalo:

- a) a posição mais próxima do olho, para a qual o cristalino, com máximo esforço, projeta a imagem focalizada na retina (25cm), é denominada ponto próximo;
- b) a posição a partir da qual o cristalino fornece imagens focalizadas, sem realizar nenhum esforço (6m), denominada ponto remoto.

### As lentes corretoras e a nitidez da imagem

Pegue novamente a vela, a lente convergente e o anteparo, e faça a montagem para a imagem aparecer focalizada.

Em seguida, afastando apenas o anteparo, a imagem perderá a nitidez, isto é, ficará desfocada.

Esta simulação corresponde à miopia e sua causa pode estar associada a um alongamento do globo ocular ou a uma mudança no índice de refração dos meios transparentes do olho (humor vítreo e aquoso).

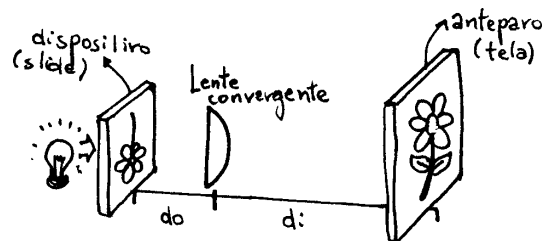
Quando uma pessoa de visão normal observa um objeto a mais de 6m, o cristalino focaliza a imagem sobre a retina, enquanto no olho míope a imagem nítida se focalizará antes da retina.

Para os míopes, a posição mais distante (ponto remoto) para um objeto projetar a imagem sobre a retina é inferior a 6m.

Como nem sempre isto é possível, a alternativa é usar lente divergente.

Assim, a luz chega ao olho mais espalhada, o que implica a necessidade de uma distância maior para voltar a convergir em um ponto.

Para simular um olho hipermetrópe, aproxime o anteparo da lente, além do seu foco, e a imagem ficará desfocada.



Simulação do olho humano

Este defeito - a imagem nítida formar-se "atrás" da retina - pode ser causado por encurtamento do globo ocular ou por anomalia no índice de refração dos meios transparentes do olho.

"Pois é", disse, "como poderá?"

"Não sei mais. Tive muitas discussões em Oxford com meu amigo Guilherme de Ockham, que agora está em Avignon. Semeou minha alma de dúvida. Porque se apenas a intuição do individual é justa, o fato que causas do mesmo gênero tenham efeitos do mesmo gênero é proposição difícil de provar. Um mesmo corpo pode ser frio ou quente, doce ou amargo, úmido ou seco, num lugar - e num outro não. Como posso descobrir a ligação universal que torna ordenadas as coisas se não posso mover um dedo sem criar uma infinidade de novos entes, uma vez que com tal movimento mudam todas as relações de posição entre o meu dedo e todos os demais objetos? As relações são os modos pelos quais a minha mente percebe a releção entre entes singulares, mas qual é a garantia de que esse modo seja universal e estável?"

"Mas vós sabeis que a uma certa espessura de um vidro corresponde uma certa potência de visão, e é porque o sabeis que podeis construir agora lentes iguais àquelas que perdestes, de outro modo como poderíeis?"

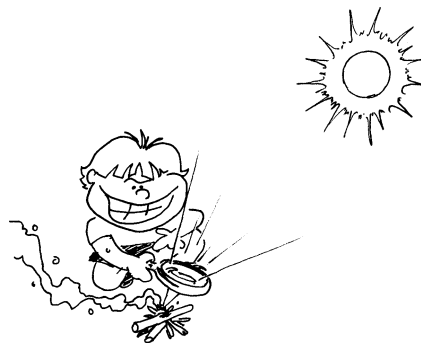
"Resposta perspicaz, Adso. Com efeito elaborei essa proposição, que à espessura igual deve corresponder igual potência de visão. Pude fazê-la porque outras vezes tive intuições individuais do mesmo tipo. Certamente é sabido por quem experimenta a propriedade curativa das ervas que todos os indivíduos herbáceos da mesma natureza têm no paciente, igualmente disposto, efeitos da mesma natureza, e por isso o experimentador formula a proposição de que toda erva de tal tipo serve ao febril, ou que toda lente de tal tipo melhora em igual medida a visão do olho. A ciência de que falava Bacon versa indubitavelmente em torno dessas proposições. Repara, estou falando de proposições sobre as coisas, não das coisas. A ciência tem a ver com as proposições e os seus termos, e os termos indicam coisas singulares. Entende, Adso, eu devo acreditar que a minha proposição funcione, porque aprendi com base na experiência, mas para acreditar deveria supor que nela existem leis universais, contudo não posso afirmá-las, porque o próprio conceito de que existam leis universais, e uma ordem dada para coisas, implicaria que Deus fosse prisioneiro delas, enquanto Deus é coisa tão absolutamente livre que, se quisesse, e por um só ato de sua vontade, o mundo seria diferente."

Umberto Eco, *Rio de Janeiro: Nova Fronteira, 1983.*  
(pág.241/242)

## Questões

1) Baseado nos trechos das páginas 77 e 80, responda:

- Qual é o defeito de visão do Guilherme? Justifique.
  - "A ciência de que falava Bacon versa indubitavelmente em torno dessas proposições." Qual é, ou o que é, essa "ciência" de que Bacon falava? Quem é esse Roger Bacon? É um personagem fictício ou real?
  - Guilherme cita ervas e lentes. Qual a relação entre elas?
- 2) Uma pessoa míope, quando criança, pode, em alguns casos, ter uma visão quase normal quando atingir a meia-idade. Por que isso é possível? Isso também ocorreria se ela fosse hipermetrope?
- 3) A lupa é uma lente de faces convexas geralmente usada como "lente de aumento". Usando uma lente desse tipo, é possível queimar papel em dia de Sol. Como se explica esse fato?



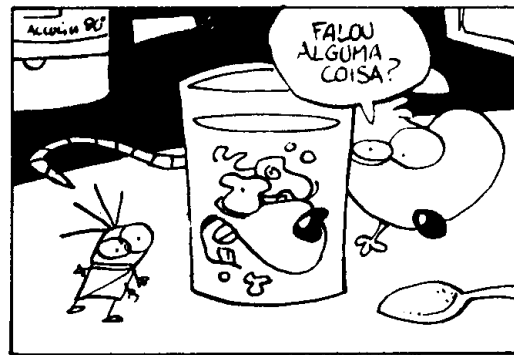
- 4) Uma pessoa de 1,80m de altura é observada por outra, situada a 40m de distância. Determine geometricamente a imagem formada na retina do observador e calcule seu tamanho, considerando que a distância da pupila à retina é de 0,02m.
- 5) Calcule a variação da vergência de um olho normal, considerando que a distância entre a lente do olho e a retina é de cerca de 2cm.
- 6) O ponto remoto de um olho corresponde à maior distância para a qual o cristalino fornece imagens nítidas sem realizar nenhum esforço. Se o ponto remoto de um olho míope é de 4m, qual a vergência do olho e a da lente usada para corrigir miopia?

# —21—

## As lentes esféricas

Como acontece a refração em lentes esféricas?

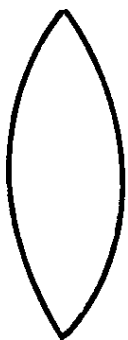
Níquel Náusea



Folha de São Paulo - 31/10/93

Repita a experiência do Flit. Não a de ficar de porre: a de olhar através de um copo cilíndrico cheio de água.

Como você enxergaria a imagem do Níquel Náusea? Em que condições você enxergaria como o Flit?



biconvexa

As lentes esféricas são delimitadas por faces curvas (calotas esféricas) e se distinguem das lentes cilíndricas por reproduzirem a mesma imagem quando giradas em torno do eixo óptico.

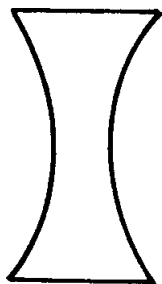
Quando as duas faces de uma lente são convexas, dizemos que ela é do tipo biconvexa e quando ambas são côncavas, a lente é denominada bicôncava.

Além destes tipos mais comuns, existem ainda as lentes plano-côncava, côncava-convexa e convexo-côncava.

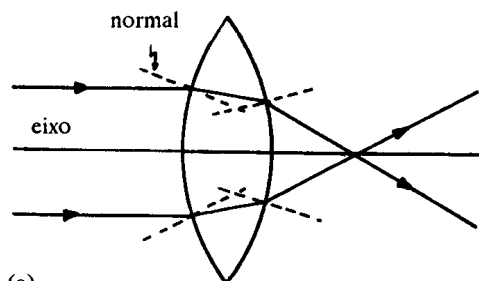
Quando um raio luminoso incide numa lente de vidro biconvexa, paralelamente ao eixo da lente, este se refrata, aproximando-se da normal (se o índice de refração do meio que a envolve for menor que o do material que a constitui).

Ao emergir dela, torna a se refratar, afastando-se da normal à segunda face.

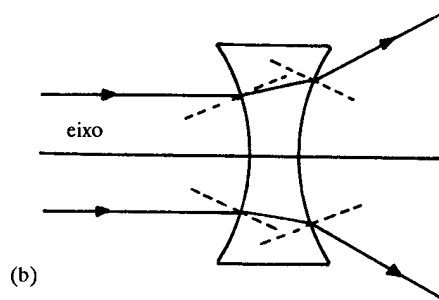
Ao emergir da segunda face, todos os raios de luz que incidiram paralelamente ao eixo da lente convergem para uma região de seu eixo, chamada foco. Por esse motivo, esse tipo de lente recebe o nome de **convergente**.



bicôncava



(a)



(b)

Comportamento convergente da lente biconvexa (a) e divergente da lente bicôncava (b), numa situação em que o índice de refração do meio é menor que o do material que constitui a lente

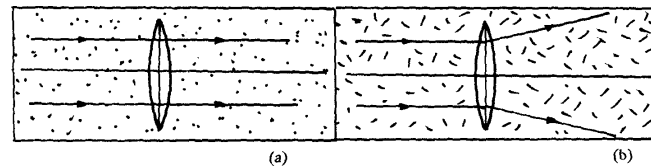
Nas lentes de vidro bicôncavas, os raios de luz que incidem na lente paralelamente ao eixo também se aproximam da normal e ao emergirem da lente para o ar refratam-se novamente, afastando-se da normal à segunda face.

Nesta situação, devido à geometria da lente, estes raios não convergem para uma região, de forma que este tipo de lente recebe o nome de **divergente**.

O fato de uma lente ser convergente ou divergente depende do meio onde ela se encontra, pois esses comportamentos estão associados às diferenças entre os índices de refração do material de que é feita a lente e do meio.

Se uma lente biconvexa encontra-se no ar, certamente se comportará como convergente, pois, seja feita de vidro ou de plástico, o índice de refração do ar será menor que o desses materiais.

Entretanto se o índice de refração do meio e do material de que é feita a lente forem iguais, os raios de luz não sofrerão desvios (isto significa que a lente ficará "invisível") e se o meio possuir índice de refração maior que o do material da lente, esta se comportará como divergente.



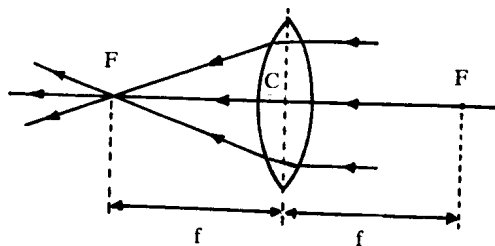
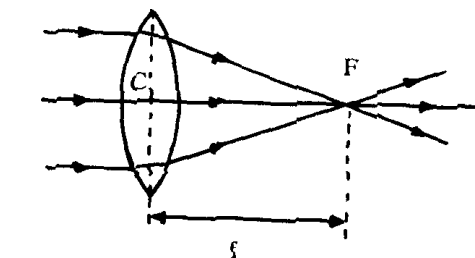
(a)

(b)

Comportamento de uma lente biconvexa quando o meio possui índice de refração igual ao do material de que é feita (a) e quando é maior (b)

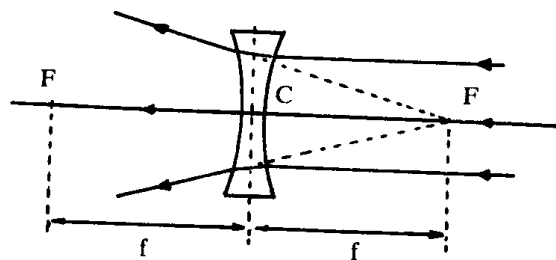
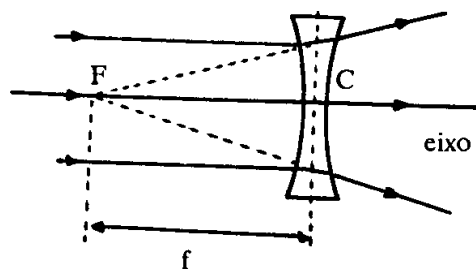
Nas lentes convergentes, a região para onde convergem os raios de luz que incidem paralelamente ao eixo é denominada **foco**.





Nas lentes divergentes não há um local de convergência dos raios de luz, mas é possível definir-se o foco deste tipo de lente através do prolongamento dos raios que emergem da segunda face.

Por isso o foco das lentes divergentes é denominado virtual.



Como os raios de luz podem incidir tanto por uma como por outra face, podemos determinar, para uma mesma lente, dois focos simétricos em relação ao centro da lente.

O traçado dos raios de luz pode ser simplificado ao considerarmos as condições de Gauss, o que permite a omissão do trajeto dos raios dentro da lente.

Além disso, para localizar as imagens formadas é suficiente acompanhar o caminho de somente dois raios de luz entre os muitos que partem de um ponto do objeto e incidem na lente.

Um deles parte de um ponto-objeto, incide paralelamente ao eixo óptico e refrata-se, passando pelo foco.

O outro é aquele que ao passar pelo centro óptico da lente não sofre nenhum desvio, devido ao comportamento simétrico da lente.

Representando num diagrama estes dois raios de luz, podemos obter o tamanho e a posição da imagem formada pela lente através do cruzamento desses raios após serem refratados.

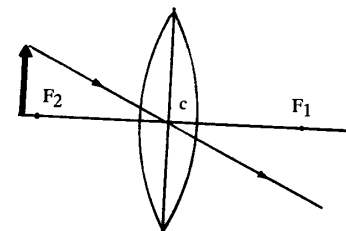
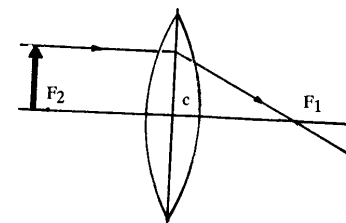
Variando-se a posição do objeto em relação à lente, o tamanho e a posição da imagem serão modificados.

No caso de lentes convergentes, quando o objeto se encontra posicionado entre o foco e a lente, os raios de luz escolhidos não se cruzam efetivamente.

Neste caso, a posição e o tamanho da imagem são determinados pelo cruzamento do prolongamento dos raios refratados.

Nas lentes esféricas divergentes, os mesmos raios de luz podem ser utilizados para determinar a posição e o tamanho das imagens por esse tipo de lente. Neste caso, a imagem é obtida pelo cruzamento entre o prolongamento do raio refratado e o raio que não sofre desvio.

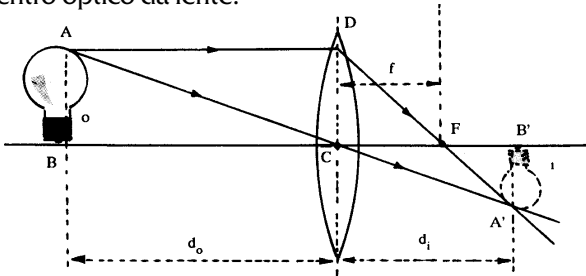
Assim, as imagens podem ser formadas pelo cruzamento efetivo dos raios refratados ou pelo cruzamento dos prolongamentos desses raios.



## As equações das lentes esféricas

As características das imagens formadas pelas lentes também podem ser determinadas analiticamente, isto é, através de equações.

Se um objeto de altura  $o$  for colocado perpendicularmente sobre o eixo principal de uma lente convergente a uma distância  $d_o$  do centro óptico da lente, a imagem formada terá uma altura  $i$  e estará situada a uma distância  $d_i$  do centro óptico da lente.



A relação entre o tamanho da imagem e o do objeto é a mesma que vimos para espelhos esféricos. Da semelhança entre os triângulos ABC e A'B'C, podemos reescrever a relação anterior da seguinte forma:

$$A = \frac{i}{o} = \frac{d_i}{d_o}$$

E da semelhança entre os triângulos CDF e A'B'F, podemos deduzir:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{d_o} + \frac{1}{d_i}$$

Esta equação pode ser aplicada a qualquer tipo de lente, convergente ou divergente, e para imagens reais e virtuais, desde que a seguinte convenção de sinais seja adotada:

a) a distância  $d_o$  (ou  $d_i$ ) será positiva se o objeto (ou a imagem) for real, e negativa se for virtual;

b) a distância focal  $f$  será positiva quando a lente for convergente, e negativa quando for divergente.

## Questões

- 1) A que distância de uma criança, cuja altura é 1m, devemos nos colocar para fotografá-la com uma máquina fotográfica de 3cm de profundidade, que permite fotos de 2cm de altura?
- 2) Uma pessoa de 1,80m de altura é observada por outra, situada a 40m de distância. Determine geometricamente a imagem formada na retina do observador e calcule seu tamanho, considerando que a distância da pupila à retina é de 2cm.
- 3) A partir da figura ao lado e considerando os triângulos semelhantes indicados você é capaz de deduzir as duas equações escritas nesta página.

# 22

## Os instrumentos ópticos

Associando-se espelhos,  
lentes e prismas,  
constroem-se os vários  
instrumentos ópticos.

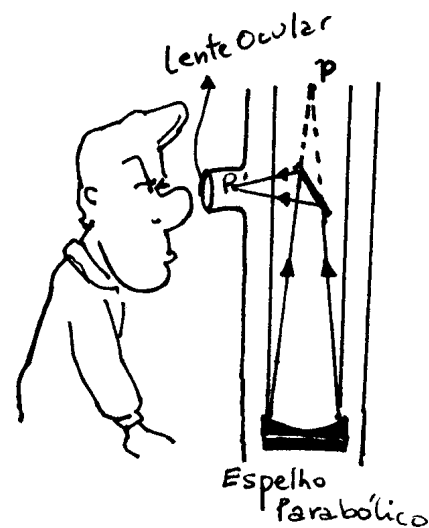
O olho humano normal sempre é capaz de perceber e focalizar um certo campo de visão, dentro do qual se inserem vários objetos. Porém, para focalizarmos um objeto próximo, tudo aquilo que está distante perde a nitidez.

Em nosso campo de visão sempre existirão objetos que se encontram a diferentes distâncias de nossos olhos. Se alguns objetos estiverem muito afastados, como a Lua e as estrelas, poderemos focalizá-los, mas seus detalhes não serão percebidos.

Por outro lado, se o objeto estiver próximo, mas for muito pequeno, como um inseto, muitos detalhes serão perdidos.

A associação conveniente de lentes a um olho de visão normal (ou corrigida) pode permitir que vejamos detalhes que a olho nu não seriam possíveis, por esses objetos estarem muito distantes ou por serem muito pequenos.

Para que um olho normal possa observar tais detalhes, é necessário ampliar a imagem do objeto, o que pode ser conseguido através de determinados instrumentos ópticos, como lupa, microscópio, retroprojetor, projetores de filme e de *slide*, luneta, telescópio, binóculo,...



### Instrumentos de observação

Lunetas, telescópios e binóculos são alguns dos instrumentos que nos auxiliam a enxergar detalhes de objetos distantes, como as montanhas, a Lua, as estrelas e muitos outros.

Se quisermos observar em detalhes objetos pequenos, como um inseto, recorreremos a outros instrumentos, como a lupa e o microscópio, cuja função é ampliar a imagem de objetos que se encontram próximos.

Estes instrumentos ópticos são constituídos basicamente pela associação de uma ou mais lentes. A **lupa** - também denominada **microscópio simples** - é constituída de uma única lente esférica convergente.



Uma lente convergente - a lupa

Quanto maior for o aumento desejado, menor deve ser sua distância focal. A lente só se comportará como lupa quando o objeto estiver colocado numa distância inferior à sua distância focal.

Apesar dessa ampliação, a lupa não serve para a observação de objetos muito pequenos como células e bactérias, pois nesses casos se faz necessário um aumento muito grande.

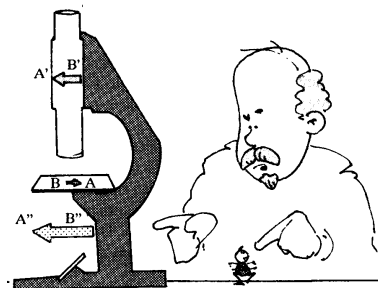
A solução é associarmos duas ou mais lentes convergentes, como no **microscópio composto**.

Uma lente de distância focal da ordem de milímetros - denominada objetiva (próxima ao objeto) - é associada a uma segunda lente - denominada ocular (próxima ao olho) - que funciona como lupa.

Em relação à primeira lente (objetiva), o objeto encontra-se posicionado entre uma e duas distâncias focais, o que permite a formação de uma imagem invertida e maior.

Esta primeira imagem deve estar posicionada dentro da distância focal da lente ocular, para que esta última funcione como uma lupa, cujo objeto é a imagem obtida com a objetiva.

A imagem final fornecida pela lente ocular será maior ainda e invertida em relação ao objeto.



Um microscópio composto-para ver coisas muito pequenas

Os **projetores** de filmes e *slides*, assim como os retroprojetores mostrado na página seguinte, também têm a função de fornecer uma imagem maior que o objeto.

Nos projetores isto é conseguido colocando-se entre o filme e a tela onde a imagem será projetada uma lente convergente.

Nestes instrumentos, o filme (objeto) além de bem iluminado, deve estar um pouco além da distância focal da lente, para que a imagem formada seja real e maior, tornando possível sua projeção na tela.

Desta forma, a lente não funciona como uma lupa, pois neste caso a imagem obtida, apesar de ainda maior, seria virtual, inviabilizando a projeção.

Como a imagem formada é invertida, o filme/*slide* é colocado invertido no projetor, para obtermos uma imagem final direita.

A **luneta astronômica** é constituída de duas lentes convergentes, uma objetiva e uma ocular, sendo a primeira de grande distância focal - da ordem de decímetros e até metros - e a segunda com distância focal menor - da ordem de centímetros.

O fato de o objeto estar muito distante faz com que a imagem formada pela lente objetiva fique posicionada na sua distância focal, comportando-se como objeto para a lente ocular.

Deste modo, o comprimento do tubo do instrumento corresponde a aproximadamente à soma das distâncias focais das lentes objetiva e ocular.

A lente ocular, que funciona como uma lupa, fornece uma imagem final virtual, invertida em relação ao objeto e mais próxima.

A **luneta astronômica** não é adequada para a observação de objetos na Terra, pois a imagem final formada por este instrumento é invertida em relação ao objeto.

As **lunetas terrestres** são adaptadas para fornecer uma imagem final direita.

Podem ser feitas várias adaptações. Na luneta de Galileu, essa inversão é obtida usando-se como ocular uma lente divergente e como objetiva uma lente convergente.

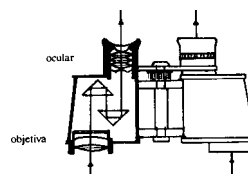
Essas lentes localizam-se uma em cada extremidade de um tubo, cujo comprimento depende das características e da necessidade de a imagem final estar localizada no ponto próximo do observador.

Nas lunetas, a dimensão das imagens formadas nas lentes depende de suas distâncias focais.

Quanto maior a distância focal da objetiva, maior a imagem por ela formada.

Com relação à ocular, quanto menor sua distância focal, maior o tamanho da imagem final, pois mais próxima da lente a imagem-objeto deverá estar posicionada.

O **binóculo** é um instrumento que pode ser construído a partir de duas lunetas terrestres do tipo Galileu.



Duas lunetas formam um binóculo

Este instrumento proporciona a sensação de profundidade, pois ao olharmos para um objeto com os dois olhos, cada olho fornece a mesma imagem vista de ângulos ligeiramente diferentes, que ao ser interpretada pelo cérebro nos dá a sensação de uma imagem tridimensional.

A ampliação obtida com este tipo de binóculo é menor se comparada com a obtida por um binóculo construído a partir de lunetas astronômicas.

Neste caso a imagem fica invertida e por isso são utilizados dois prismas de reflexão total para cada luneta, de forma que a imagem fique direita.

A disposição destes prismas permite também que o comprimento do instrumento seja reduzido.

O **telescópio** também é parecido com a luneta astronômica. É constituído por duas lentes convergentes, sendo a objetiva de grande distância focal e a ocular de pequena distância focal.

Ele recebe o nome de telescópio de refração e é construído de forma que possa trabalhar com diversas oculares, de diferentes distâncias focais, e ser ajustado para vários aumentos.

As características das lentes objetiva e ocular determinam o aumento que é capaz um telescópio refrator.

Esse aumento possui limitações relacionadas ao tamanho do tubo necessário para acomodar as lentes e também aos fenômenos de difração e de aberrações cromática e esférica.

## Questões

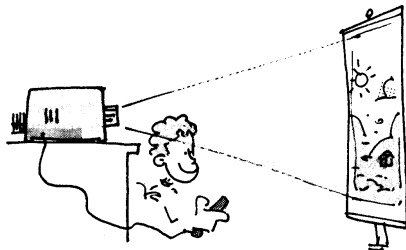
No **retroprojektor**, a associação de lentes convergentes e um espelho plano também fornece uma imagem ampliada do objeto, que neste caso é um texto ou uma figura impressa num tipo de plástico, conhecido como transparência.

A luz, posicionada na base do instrumento, atravessa a figura a ser projetada e incide numa lente convergente, que forma no espelho plano, uma imagem maior do que o objeto.

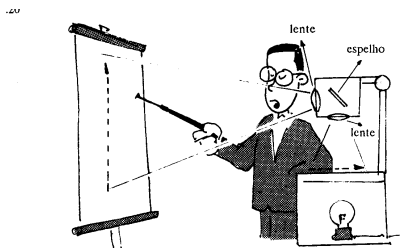
O espelho reflete essa imagem, que servirá de objeto para uma segunda lente convergente colocada em ângulo reto. Esta segunda lente forma na tela uma imagem final direita e maior que o objeto.

Neste instrumento as imagens formadas pelas duas lentes também deverão ser reais, pois a primeira imagem será objeto para a segunda lente, enquanto esta imagem final deverá ser real para tornar possível sua projeção.

Desta forma, tanto a imagem-objeto como a final deverão estar posicionadas fora da distância focal das lentes.



Um projetor de slides



Num retroprojektor o espelho plano faz a diferença

1) O tamanho da imagem obtida por uma luneta é maior do que o tamanho do objeto? Justifique.

2) A lupa é uma lente de faces convexas geralmente usada como "lente de aumento". Usando uma lente desse tipo, é possível queimar pedaços de madeira seca ou de papel quando nela incidem os raios de Sol. Como se explica esse fato?

3) Um microscópio caseiro foi construído com duas lentes convergentes de distâncias focais iguais a 1 cm (objetiva) e 3 cm (ocular). De um objeto situado a 1,2 cm da objetiva, o instrumento fornece uma imagem virtual localizada 25 cm da ocular. Determine:

a) o aumento linear transversal fornecido pela objetiva e pela ocular;

b) o aumento linear transversal do microscópio;

c) a distância entre as duas lentes.

4) Uma luneta astronômica simples é constituída por duas lentes convergentes com distâncias focais de 60 cm (objetiva) e 1,5 cm (ocular). A imagem de um astro, observada através desse instrumento, forma-se a 43,5 cm da ocular. Determine:

a) o comprimento do tubo que constitui a luneta;

b) o aumento linear transversal fornecido pela luneta.