AULA

33

Atira mais em cima!

PARA COMEÇAR

O pessoal está reunido na casa de Gaspar e Alberta. O almoço acabou e todos conversam em torno da mesa.

– Eu soube que você está interessado em ótica – diz Gaspar a Ernesto. – Então vou mostrar uma coisa interessante.

Gaspar pega um copo de plástico e coloca uma moeda no fundo. Faz um canudo com uma folha de papel e o prende no gargalo de uma garrafa. Ao mesmo tempo, diz para Ernesto:

– Coloque esta garrafa diante do copo de maneira que você, olhando pelo canudo, não possa ver a moeda no fundo do copo, mas quase!

Ernesto faz o que Gaspar pediu e pergunta:

– E daí? Não aconteceu nada! (Figura 1)

– Certo! – diz Gaspar. – Mas, agora, vou colocar água no copo lentamente, para que a moeda não mude de lugar. Enquanto isso, você fica observando pelo canudo.

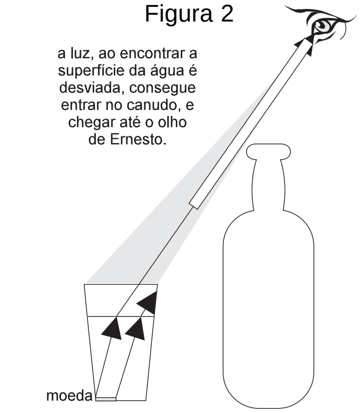
Figura 1

À medida que Gaspar vai colocando água dentro do copo, Ernesto começa a falar:

– Ih, estou começando a ver o fundo do copo! Olha lá a moeda! Estou vendo a moeda! Agora não estou entendendo mais nada! A luz não está andando em linha reta? Eu já fiz um experimento para provar que a luz anda em linha reta e agora parece que estou provando que ela não anda! Dessa vez ela não está andando em linha reta?

– É verdade – diz Gaspar. – Aqui a luz não está andando **uma vez** em linha reta. Ela está andando duas vezes em linha reta. Uma vez na água e outra vez no ar. O princípio da propagação retilínea diz que **em um meio transparente** a luz anda em linha reta. Nesse caso, a luz parece não estar andando em linha reta, pois temos **um par de meios**: a água e o ar!

Figura 2



Cada par entorta de uma maneira

Roberto e Cristiana aproximam-se, curiosos. Gaspar, sentindo-se prestigiado, pega um papel, desenha os dois esquemas da figuras 3a e 3b e começa a explicar, com ar de professor:

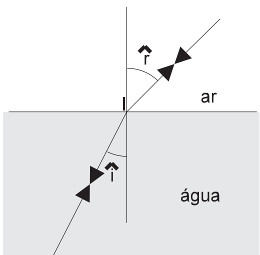


Figura 3a

– A luz sai da água e, ao atravessar a superfície que separa a água do ar, é desviada (Figura 3a). Para cada ângulo de incidência $\hat{i}$ temos um ângulo de refração $\hat{r}$. Se aumentarmos o ângulo de incidência, vamos aumentar o ângulo de refração. Mas sempre vai valer sempre a lei da refração.

$$\frac{\text{sen } \hat{i}}{\text{sen } \hat{r}} = \text{constante}$$

– Essa constante é chamada índice de refração do segundo meio com relação ao primeiro. No caso de a luz estar passando da água (primeiro meio) para o ar (segundo meio), o índice de refração vale $\frac{3}{4}$. Então o índice de refração do ar com relação à água vale $\frac{3}{4}$. Se a luz estivesse passando do ar para a água, a constante iria valer $\frac{4}{3}$, ou seja, o inverso de $\frac{3}{4}$.

– Quando um raio luminoso passa do ar para a água, ele se aproxima da normal. Diremos então que a água é **mais refringente** do que o ar. Quando passa da água para o ar, o raio luminoso se afasta da normal. Se o raio luminoso incidir perpendicularmente à superfície, ele não vai sofrer desvio algum. Mesmo assim, a lei da refração continua valendo.

– Em geral o índice de refração é representado pela letra n. Para indicar se o índice é o da água com relação ao ar ou vice versa, escrevemos:

$$n_{\text{ar, água}} = \frac{3}{4} \quad \text{e} \quad n_{\text{água, ar}} = \frac{4}{3}$$

– A lei da refração para um raio luminoso que passe de um meio 1 para um meio 2 ficará com o seguinte aspecto:

$$\frac{\text{sen } \hat{i}}{\text{sen } \hat{r}} = n_{2,1}$$

– Note que o índice de refração que aparece é o do segundo meio com relação ao primeiro.

Mas, se a luz estivesse passando de um bloco de vidro em direção ao ar (Figura 3b), ou do ar para o vidro, esses valores seriam aproximadamente $\frac{2}{3}$ e $\frac{3}{2}$. Ou seja, para cada par de meios que a luz atravessa, temos um índice de refração.

E Gaspar termina:

– Comparando esses dois desenhos que fiz, dá para ver que, mesmo que os ângulos de incidência sejam iguais, os ângulos de refração podem ser diferentes se o par de meios for diferente. Cada par entorta de uma maneira. E tenho dito!

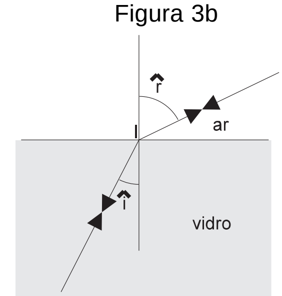
Os presentes aplaudem.

– É, eu tinha estudado um pouco para poder responder a todas perguntas que o Ernesto pudesse fazer e, agora, ele nem está aqui. Parece que saiu com o Maristela.

– E eu vou ter de saber todos os valores de índices de refração para saber como a luz se comporta em cada caso? – pergunta Roberto, interessado.

– Vai! Mas não é preciso decorar isso. Ninguém sabe o índice de refração de todas substâncias. Para isso exixtem tabelas.

Figura 3b



Deu zebra!

Roberto pede os esquemas para Gaspar e começa a analisá-los. Ao mesmo tempo, Gaspar vai fazendo um novo desenho.

– Veja, quando a luz sai da água e vai para o ar, o ângulo de incidência é menor que o ângulo de refração. Quando eu vou aumentando o ângulo de incidência, o ângulo de refração aumenta ainda mais. Vai chegar uma hora em que o ângulo de refração vai valer 90º, e o ângulo de incidência é menor que 90º. Se eu aumentar o ângulo de incidência, como para esse raio 4, o que vai acontecer?

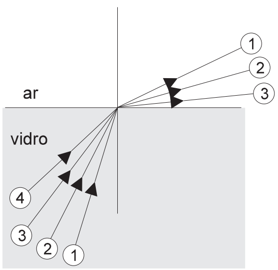


Figura 4a

– Ih! Deu zebra! Não tenho idéia! – diz Gaspar.

Nesse instante chegam Ernesto e Maristela, que tinham repetido o experimento da moeda dentro do copo. Roberto explica a situação e pergunta:

– Você sabe como vai ser refratado esse raio? Parece que ele vai acabar voltando para dentro da água.

– É isso mesmo! Ele volta para dentro da água! – diz Maristela. – E, como está voltando para o mesmo meio do qual saiu, trata-se de um raio refletido e que vai seguir as leis da reflexão. Mais ainda: como nenhuma parte da luz é refratada, trata-se de uma **reflexão total**. Toda luz é refletida! Esse fenômeno aparece nas fibras óticas que são utilizadas para transmissão de informações. A luz penetra na fibra ótica e não consegue sair, pois é constantemente refletida pelas paredes da fibra. Enquanto nas transmissões comuns as informações são transportadas por meio de impulsos elétricos, nas fibras óticas usa-se a luz como meio de transporte das informações (ver Figura 4b).

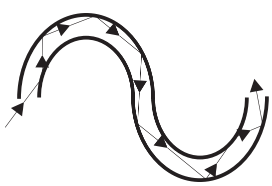


Figura 4b

Ângulo limite

Vamos considerar raios luminosos como aqueles que Roberto desenhou (ver Figura 5). Vai existir um raio luminoso que entra com um ângulo λ e sai com um ângulo de refração igual a 90º. Outros raios que incidam com ângulos maiores, serão refletidos. Esse ângulo λ é chamado **ângulo limite de incidência**, pois, a partir dele, não teremos mais raios refratados.

Podemos calcular o valor do ângulo limite para o caso no qual a luz passa do vidro para a água. Sabemos que o índice de refração do ar com relação ao vidro vale $\frac{2}{3}$. Então, utilizando a lei da refração para o caso da Figura 5, teremos:

$$\frac{\text{sen }\lambda}{\text{sen }90^\circ} = n_{\text{ar, navio}} = \frac{2}{3}$$

$$\frac{\text{sen }\lambda}{1} = \frac{2}{3}$$

$$\text{sen}\,\lambda = \frac{2}{3}$$

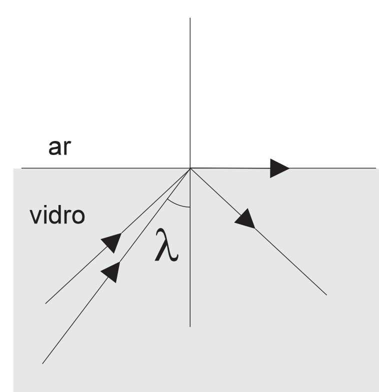


Figura 5

Procurando numa tabela ou usando uma calculadora, podemos ver que o ângulo que tem seno igual a $\frac{2}{3}$ vale aproximadamente 42º. E esse é o **ângulo limite** para o caso da luz que passa do vidro para a água.

O dióptro plano

Agora já estamos em condições de explicar o que aconteceu com a moeda que estava dentro do copo e, aparentemente, subiu. Os raios luminosos, ao passar de um meio para outro, sofrem desvios. Dessa maneira, se tivermos um objeto dentro d'água, os raios luminosos que são emitidos por ele vão ter suas trajetórias modificadas ao passar da água para o ar, formando uma imagem num ponto diferente daquele em que se situa o objeto. Um conjunto de dois meios separados por uma superfície plana, como a água dentro do copo e o ar, é chamado de **dióptro plano.**

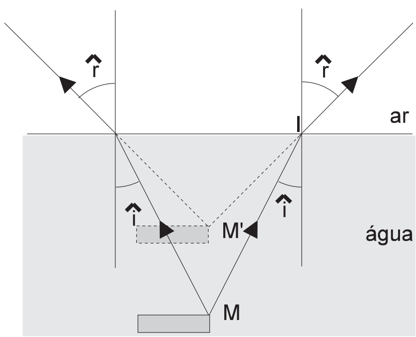


Figura 6a

Vamos tentar explicar como é formada a imagem da moeda dentro do copo. Se considerarmos dois raios luminosos que partem de um ponto M da moeda, podemos dizer que esse ponto M é um ponto objeto (Figura 6a).

Onde estará o ponto imagem? Ora, os raios luminosos, ao atingir a superfície da água, sofrem refração, mudando de direção. Para um observador do lado de fora, os raios parecem estar vindo de um ponto M'. Esse ponto é a imagem de M.

A posição dessa imagem depende de que ponto estamos olhando. Isto é: dependendo de como olharmos, ela vai parecer mais ou menos elevada. Se olharmos numa direção aproximadamente perpendicular à superfície da água, vai existir uma relação entre a distância do objeto e a distância da imagem. Essa relação é:

$$\frac{\text{distância da imagem até a superfície}}{\text{distância do objeto até a superfície}} = n_{2,1} = n_{\text{ar, água}}$$

Por exemplo, vamos supor que a moeda está no fundo do copo e que a água atinja a altura de 12 cm. A que altura alguém que observe a moeda numa direção aproximadamente perpendicular vai vê-la?

Vamos ter:

$$\frac{x}{12\text{ cm}} = \frac{3}{4}$$

$$x = 9\text{cm}$$

Então, a moeda vai ser vista a uma distância de 9 cm.

Nós construímos a imagem da moeda do mesmo tamanho que a moeda propriamente dita. Isso é um fato e podemos prová-lo facilmente, obtendo a posição do ponto situado do lado oposto da moeda. A água não aumenta o tamanho de um objeto mergulhado nela, mas aproxima esse objeto de quem está olhando, dando assim a impressão de que ele é maior.

Roberto, Gaspar e Ernesto foram fazer uma visita ao Mundo Submarino, o aquário da cidade.

– Olhem esses peixes – diz Roberto. – Assim como a moeda dentro do copo, eles devem estar mais longe do que parece!

Gaspar concorda.

– Mas como será que eles estão nos vendo? Mais próximos ou mais longe do que realmente estamos? – pergunta Gaspar. E ele mesmo responde.

– Eu acho que mais longe! Veja, vou seguir o mesmo raciocínio usado para o caso da moeda. Quem está nos observando é o peixe. A luz parte da gente e entra no aquário.

Gaspar começa a fazer um desenho, seguido com atenção por Roberto e Ernesto (Figura 6b).

– Os raios luminosos saem da gente, do ponto N, e se aproximam da normal. Então, nossa imagem vai ficar mais longe, no ponto N'! O peixe vai nos ver mais longe do que estamos!

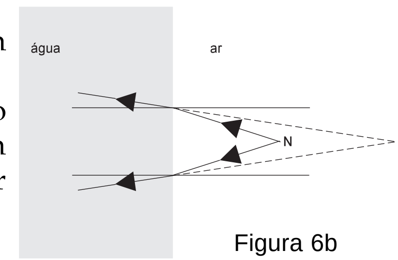


Figura 6b

As lentes

As aplicações mais importantes dos dióptros, na vida cotidiana das pessoas, estão nas lentes. Nós as utilizamos nos telescópios, para estudar o Universo, nos projetores dos cinemas, em aparelhos fotográficos, até na observação de seres muito pequenos, com o microscópio. Elas nos ajudam também a corrigir defeitos de visão, em óculos, por exemplo.

As lentes, em geral feitas de vidro, possuem duas faces. Uma das faces é, necessariamente, uma superfície curva. A outra pode ser outra superfície curva ou uma superfície plana. Dependendo das superfícies que compõem a lente, temos denominações como plano-convexa, biconvexa, bicôncava, plano-côncava (ver Figura 7). As superfícies curvas das lentes que estudaremos são superfícies esféricas.

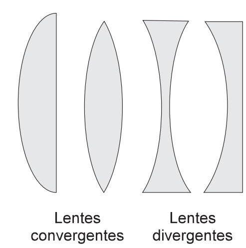


Figura 7

As lentes podem ser também classificadas em **convergentes** ou **divergentes**. Na Figura 8 temos dois exemplos de lentes, uma convergente e uma divergente.

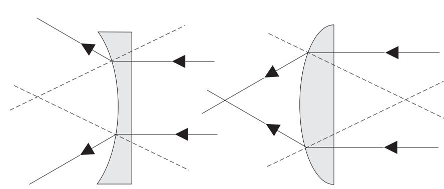


Figura 8

A lente da esquerda é uma lente plano-côncava. Ela é divergente. Se fizermos dois raios paralelos incidirem nessa lente, eles vão se comportar da seguinte maneira: em primeiro lugar, encontram a face plana e penetram na lente sem desvio, pois estão incidindo perpendicularmente a essa face da lente. Em seguida, penetram no vidro e encontram a segunda face. Ao sair, vão se afastar da normal (reta pontilhada na figura), pois o vidro, como vimos, é mais refringente que o ar. Assim, raios luminosos que entram **paralelamente** saem divergindo. Daí o nome **lentes divergentes**.

Você poderá agora analisar a lente que está à esquerda da figura e, da mesma maneira, descobrir por que ela é uma **lente convergente**.

As lentes são representadas, simbolicamente, por um traço vertical com duas pontas de flecha nas suas extremidades, como pode ser visto na Figura 9.

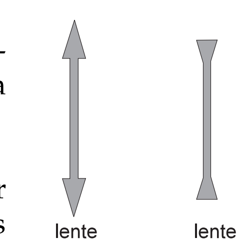


Figura 9

Construção geométrica de imagens dadas por lentes

Assim como fizemos para os espelhos esféricos, podemos obter as imagens de objetos dadas por lentes esféricas. Como nos espelhos, as lentes têm focos, um vértice e um eixo principal. Aqui também existem construções geométricas que nos permitem construir as imagens de objetos formadas pelas lentes. As construções que nos auxiliam a obter as imagens dos objetos estão nas Figuras 10a, 10b e 10c.

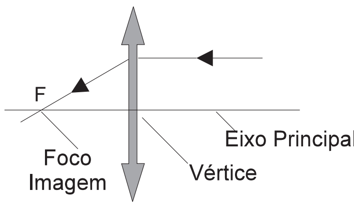


Figura 10a

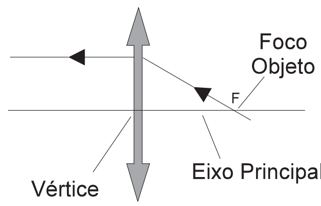


Figura 10b

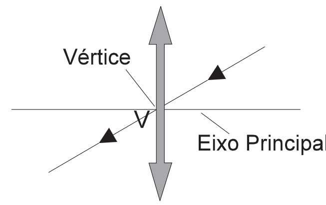


Figura 10c

Mas de que lado da lente estão os focos?

Essa noção é apenas uma referência e vai nos servir para determinar as posições das imagens dos objetos. Para isso, devemos saber de que lado da lente está vindo a luz do objeto em questão. No caso de uma lente convergente, o foco objeto está do lado em que a luz está incidindo. O foco imagem está do lado pelo qual a luz está saindo. No caso de uma lente divergente, as posições são invertidas.

Na primeira construção (Figura 10a), um raio luminoso que incide paralelamente ao eixo da lente sai passando pelo foco imagem da lente. Na segunda (Figura 10b), um raio que caminhe numa direção que passe pelo foco objeto sai da lente paralelamente. Finalmente, um raio luminoso que incida no vértice da lente não sofre desvio em sua trajetória (Figura 10c).

Utilizando duas dessas construções, podemos obter as imagens dos objetos gráficamente. Note que, no caso de uma lente, os focos objeto e imagem não estão no mesmo ponto, como aconteceu com os espelhos. Eles estão um em cada lado da lente.

Os focos das lentes podem ser melhor entendidos se considerarmos o seguinte exemplo: uma lâmpada colocada a grande distância de uma lente forma sua imagem no foco imagem. Se, por outro lado, colocarmos a lâmpada no foco objeto, sua imagem vai se formar a uma distância muito grande: no infinito, diríamos. Tanto o foco objeto como o foco imagem estão à mesma distância da lente. Essa distância é chamada **distância focal da lente**.

Vamos utilizar essas contruções auxiliares para obter a imagem de objetos colocados diante de algumas lentes. Inicialmente, vamos supor que tenhamos uma lâmpada diante de uma lente convergente e que ela esteja além do foco objeto F_O, como está representado na Figura 11.

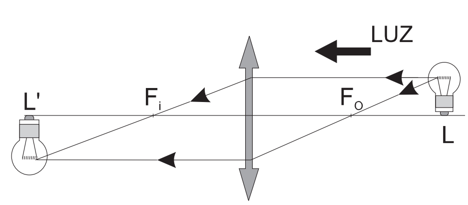


Figura 11

Um raio luminoso que parta de um ponto da lâmpada e incida paralelamente ao eixo será refratado, passando pelo foco imagem F_I . Um raio que parta da lâmpada e incida na lente, passando pelo foco objeto F_O , sairá da lente paralelamente ao eixo da mesma. Na intersecção desses dois raios, temos a imagem daquele ponto do filamento. Os raios, ao sair da lente, convergem para um ponto: logo, a imagem será real. Usamos um processo parecido quando queremos queimar um pedaço de papel utilizando uma lente para concentrar a luz do Sol. Você pode constatar, a partir dessa construção, que a imagem L' tem posição invertida com relação à do objeto.

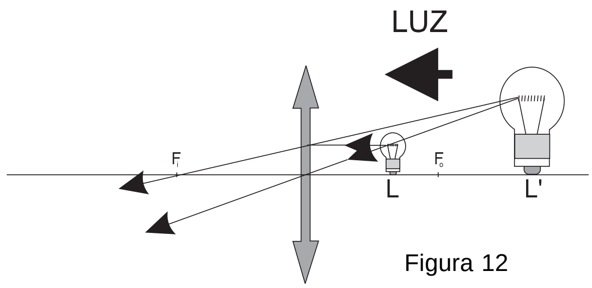


Figura 12

Se, por outro lado, a lâmpada estivesse entre o foco objeto e a própria lente, como é o caso da Figura 12, poderíamos utilizar, por exemplo, um raio que incidisse paralelamente ao eixo e outro que passasse pelo vértice da lente. O primeiro seria refratado de maneira análoga à anterior. O segundo passaria sem desvio. Nesse caso, os raios saem da lente de maneira divergente. Logo, a imagem é virtual.

Uma lente convergente, usada nessas condições, produz uma imagem L' que está com orientação igual à do objeto, porém aumentada. Dessa maneira, ela pode nos auxiliar a observar os objetos com maiores detalhes: é o que chamamos de **lente de aumento**. Note que uma lente convergente também pode produzir um feixe divergente, como foi esse caso, em particular.

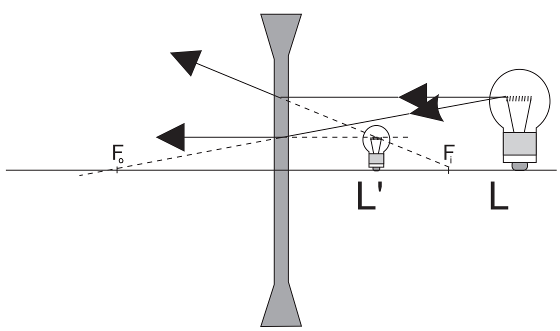


Figura 13

Vamos ver o que acontece quando a lente é divergente. Nesse caso, os focos estão em posição trocada com relação ao que falamos acima. Mas as construções são idênticas, como pode ser visto na Figura 13. Um raio luminoso que entre paralelamente ao eixo da lente sai passando pelo foco imagem. Um raio que passe pelo vértice não sofre desvio. Pode-se notar que a imagem da lâmpada aparece menor e com a mesma orientação da lâmpada. Como os raios que estão saindo são divergentes, a imagem é virtual.

Calculando a posição das imagens e seu tamanho

Assim como no caso dos espelhos, existe uma equação que serve para determinar a posição da imagem de um objeto. Outra equação nos permite calcular o tamanho da mesma. Como no caso dos espelhos, chamamos de **p** a distância do objeto à lente, e de **p '** a distância da imagem à lente. A equação também é muito parecida. Se a distância focal for indicada pela letra **f**, a equação que relaciona a posição do objeto com a da imagem é:

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

Se chamarmos de **o** a altura do objeto e de **i** a altura da imagem, a equação que nos dá o tamanho da imagem em função do tamanho do objeto é:

$$\frac{i}{o} = -\frac{p'}{p}$$

Para resolver problemas que envolvam lentes, usamos um sistema de referência similar ao da Figura 14. Nele representamos uma lente convergente. Seu foco objeto está, como já mencionamos anteriormente, do lado de onde vem a luz, ou seja, do lado direito da figura. O foco imagem dessa lente encontra-se à esquerda da lente. Para lentes divergentes, a situação dos focos é inversa. O foco objeto de uma lente divergente é virtual.

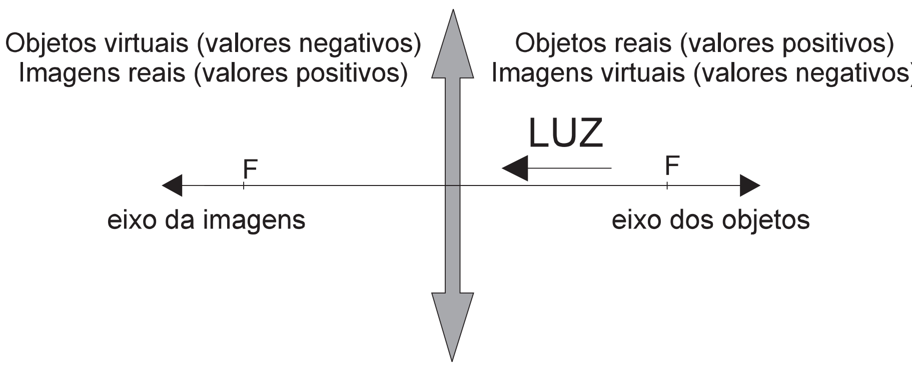


Figura 14

A lente divide o espaço em duas partes. De um lado temos o espaço das imagens reais e dos objetos virtuais (à esquerda na figura) e, do outro, as imagens virtuais e os objetos reais (à direita na figura). Para localizar objetos utillizamos um eixo e para localizar as imagens, outro. Se orientarmos o eixo dos objetos na direção contrária à da luz e eixo das imagens na direção da luz, veremos que **tudo que for real será representado por uma distância positiva e tudo que for virtual será representado por uma distância negativa**.

Passo a passo

1. Um objeto de 12 cm de altura está colocado a 80 cm de distância de um espelho esférico cuja distância focal vale 40 cm. Em que ponto vai ser formada a imagem? Qual a altura da mesma e qual a sua natureza (real ou virtual)?
A equação de conjugação nos dá:

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

$$\frac{1}{80}+\frac{1}{p'}=\frac{1}{40}$$

$$\frac{1}{p'}=\frac{2-1}{80}=\frac{1}{80}$$

$$p' = 80\text{cm}$$

Como o valor de p′ é positivo, p′ está na região das imagens reais. Já o tamanho da imagem será dado por:

$$\frac{i}{o} = -\frac{p'}{p}$$

$$\frac{i}{12\text{ cm}} = -\frac{80}{80}$$

$$i = -12\text{ cm}$$

Nesse caso, o tamanho da imagem é igual ao do objeto. O sinal negativo indica apenas que objeto e imagem têm orientação oposta.

2. Vamos supor que, no exercício anterior, o objeto estivesse a uma distância de 20 cm da lente. Em que ponto seria formada a imagem? Qual a sua altura e qual a sua natureza?

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

$$\frac{1}{20} + \frac{1}{p'} = \frac{1}{40}$$

$$\frac{1}{p'} = \frac{1-2}{40}$$

$$p' = -40\text{ cm}$$

Como p′ tem valor negativo, essa imagem é virtual. Da mesma maneira, podemos saber o tamanho da imagem. Teremos:

$$\frac{i}{o} = -\frac{p}{p'}$$

$$\frac{1}{12} = -\frac{-40}{20}$$

$$i = 24\text{ cm}$$

O valor de i é positivo. Isso indica que o objeto e a imagem têm a mesma orientação.

3. Um objeto de 6 cm de altura está colocado a 48 cm de uma lente divergente cuja distância focal é 36 cm. Dê a posição, o tamanho e a natureza da imagem.

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

$$\frac{1}{48} + \frac{1}{p'} = -\frac{1}{36}$$

$$\frac{1}{p'} = -\frac{1}{36} - \frac{1}{48} = -\frac{7}{144}$$

$$p' \cong -21\text{ cm}$$

Como o valor de p′ é negativo, a imagem é virtual. Vamos agora calcular o tamanho da imagem. Teremos:

$$\frac{1}{o} = -\frac{p'}{p}$$

$$\frac{i}{6} = -\frac{-\frac{144}{7}}{48}$$

$$i \cong 2{,}6 \text{ cm}$$

O valor positivo de i mostra que o objeto e a imagem têm a mesma orientação.

PARA TERMINAR

Nesta aula você aprendeu:

- que quando um raio luminoso incide na superfície de separação de dois meios transparentes ele sofre refração, isto é, tem sua direção mudada;
- que essa mudança de direção depende dos meios que a luz atravessa;
- o que é o ângulo limite;
- o que são lentes e como elas se comportam quando atravessadas por raios luminosos;
- como são formadas as imagens nas lentes e como podemos calcular a altura e a posição dessas imagens.

Exercício 1
Calcule o ângulo limite de incidência quando os meios atravessados pela luz forem a água e o ar.

Exercício 2
Uma pessoa situada a 72 cm da parede de um aquário observa um peixe que está a 36 cm da mesma parede. A que distância da parede do aquário cada um vê o outro?

Exercício 3
Construa graficamente a imagem de um objeto real, dada por uma lente convergente, quando o objeto está:
a) entre o foco e o vértice da lente.
b) além do foco.

Exercício 4
Construa graficamente a imagem de um objeto real dada por uma lente divergente.