

# O estudo da refração e a lei angular

## Marcos Martinho

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio de Janeiro, Sacra Família do Tinguá, Engenheiro Paulo de Frontin, RJ, Brasil  
E-mail: marcos.martinho@ifrj.edu.br

## Vitorvani Soares

Instituto de Física, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil  
E-mail: vsoares@if.ufrj.br

O estudo da refração luminosa, a partir da experimentação, tem sido apresentado pelo viés da ótica física, tanto em livros didáticos como em artigos científicos. Poucas propostas têm se preocupado em apresentar o fenômeno na perspectiva da ótica geométrica, ou seja, pela percepção da imagem formada através de um diopetro. Neste trabalho, em vez de usar ponteiras laser para visualizar a trajetória do raio de luz (recurso instrucional comum no estudo da ótica), descrevemos um método para o estudo da refração a partir da análise de imagens refratadas através de uma lente semicilíndrica. Com a análise dos dados angulares obtidos com o experimento, derivamos a lei de Snell-Descartes partindo da variação geométrica das posições observadas. A proposta é simples e fácil de ser desenvolvida em qualquer sala de aula. Além da apresentação do aparato experimental, também apresentamos os procedimentos necessários para o uso do recurso instrucional, mostrando um roteiro para guiar a atividade e as possibilidades didáticas do experimento. O professor de física poderá utilizar o aparato experimental com intuito de explicar a formação de imagens. Desse modo, ele pode relacionar os resultados e as conclusões obtidas para comparação das imagens projetadas por reflexão ou projeção (sombras e câmara escura) e levar o estudante a compreender, no sentido mais amplo, o significado da ótica geométrica.

## Introdução

Desde a Antiguidade existe uma preocupação com o entendimento da visão, que se dividia em três tradições de pesquisa (filosófica, médica e matemática) [1]. O uso da geometria proporcionou um grande avanço para a compreensão da formação das imagens observadas por projeções, reflexão e refração. Podemos dizer que, naquele período, os estudiosos procuravam localizar as imagens produzidas por efeitos ópticos por meio de relações de causa e efeito. Esse procedimento permitia que eles descrevessem vários fenômenos naturais como, por exemplo, a refração atmosférica.

Atualmente, podemos caracterizar o estudo da ótica geométrica a partir dos princípios da propagação retilínea da luz e da reversibilidade luminosa. Os livros didáticos explicam os fenômenos ópticos apresentando construções de imagens através da formação de sombras, das câmaras escuras, espelhos e lentes. Para tal, usam as noções de raio de luz e as leis que regem seu comportamento. Contudo, quando o assunto é o fenômeno da refração, partem da ótica física, priorizando aspectos da natureza da luz, tais como sua velocidade e o conceito de índice de refração. A formação de imagens por diopetros planos é pouco discutida, tanto nos livros como em sala de aula [2]. Por exemplo, a imagem de uma colher dentro de um copo com água não é discutida, mas apenas apresentada como ilustração de um efeito proporcionado pelo fenômeno da refração.

No contexto educacional, o ensino da refração deve desenvolver nos estudantes

a compreensão da formação de imagens conjugadas em diopetros planos e lentes, localizando-as graficamente, e fornecer uma descrição matemática do fenômeno observado, a conhecida lei de Snell-Descartes. Em sala de aula, as atividades didáticas seguem o caminho dos livros didáticos. Alguns autores evidenciam o comportamento dos raios de luz e da determinação do índice de refração [3-4], e não a formação ou a localização da imagem de um objeto através de dois meios diferentes e homogêneos.

Geralmente, as atividades experimentais associadas à refração são apresentadas com o auxílio de um feixe laser [5-7] e existem poucas propostas didáticas que apresentem uma abordagem experimental para a verificação direta da lei dos senos a partir da imagem refratada de um objeto por um diopetro. Dentre essas propostas,

**Quando o assunto é refração, alguns autores partem da ótica física e priorizam aspectos da natureza da luz tais como a sua velocidade e o conceito de índice de refração e não a formação ou a localização da imagem de um objeto através de dois meios diferentes e homogêneos**

podemos destacar a de Grushe e Wagner, que apresenta uma variação do experimento de Kepler para a dedução da lei de Snell [8]. Com base no exposto, nosso objetivo é apresentar uma proposta didática que permita descrever a refração segundo as tradições da ótica

geométrica e, a partir das observações realizadas, deduzir a lei matemática aceita para o fenômeno. Nas próximas seções, apresentamos os materiais utilizados no experimento, a metodologia experimental, os resultados e suas respectivas análises.

## Materiais utilizados

A descrição geométrica da posição da imagem de um objeto, quando este é observado através de um meio transparente, pode ser compreendida inicialmente com o uso dos seguintes materiais, ilus-

trados na Fig. 1 e descritos a seguir.

- Uma lente semicilíndrica feita em acrílico e de diâmetro  $D = 56,0$  cm e altura  $h = 2,0$  cm, que compõe o dioptra ar-acrílico.
- Sete cilindros equiláteros de diâmetro  $d = 2,0$  cm, representando os objetos.
- Cinco discos opacos, de diâmetro  $d = 2,0$  cm, para indicar a posição da respectiva imagem de cada objeto.
- Um esquadro e uma régua milimetrada, para a orientação das posições dos objetos e suas imagens.

### Metodologia

O objetivo desse arranjo experimental é localizar as imagens de objetos colocados ao redor do arco de circunferên-

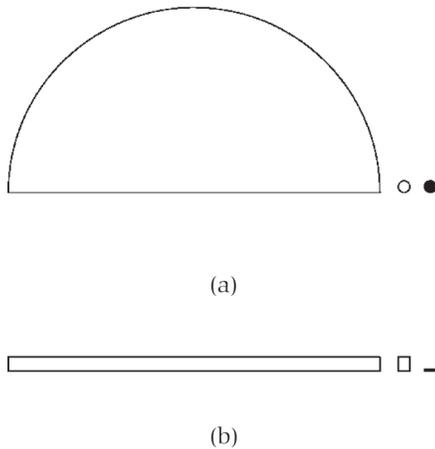
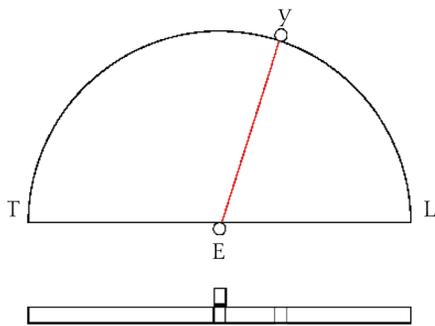


Figura 1: (a) Vista superior e (b) vista de frente de um disco semicilíndrico feito em acrílico, de diâmetro  $D = 56,0$  cm e altura  $h = 2,0$  cm, igual à altura do pequeno cilindro equilátero em acrílico, de diâmetro  $d = 2,0$  cm. Um pequeno disco opaco (em preto, na figura), de diâmetro igual ao do pequeno cilindro também é utilizado na atividade.



cia da lente semicilíndrica. Para tal, devemos proceder da seguinte maneira: o disco semicilíndrico é colocado sobre um plano horizontal e, com uma régua milimetrada, localizamos o ponto médio  $E$  que indica o centro da interface reta do nosso sistema óptico, o dioptra ar-acrílico. Para indicar esse ponto  $E$ , colocamos um dos pequenos cilindros de acrílico nessa posição, como indicado na Fig. 2a. Em seguida, colocamos um outro cilindro na posição  $y$  e devemos localizar sua imagem olhando pelo centro óptico  $E$ , na face frontal do arranjo experimental.

A partir disso, observamos que a imagem dos objetos é formada no interior da lente semicilíndrica. Com o auxílio de um terceiro cilindro, deslizamos sobre a face superior, fazendo suas geratrizes coincidir com as geratrizes da imagem observada. Marcamos essa posição com os discos opacos, que podem ser colocados embaixo do cilindro deslizante antes de começar o procedimento. Desse modo, quando as geratrizes se encontram, podemos remover o cilindro deslizante e deixar o disco opaco indicando a posição  $H$  da imagem observada. Esse procedimento está ilustrado na Fig. 2.

Esse procedimento permite definir univocamente o ponto  $H$  sobre o semidisco com a posição correspondente da imagem do objeto, percebida através do dioptra pelo observador em  $E$ , como indicado na Fig. 2c. Em seguida, distribuímos aleatoriamente outros cilindros similares ao longo da face curva e localizamos geometricamente as respectivas imagens desses objetos, vistas pelo mesmo observador através do mesmo disco semicilíndrico transparente, como ilustrado na Fig. 3.

### Resultados e discussões

Podemos observar, da Fig. 3, que: (1) todas as posições das imagens dos seus respectivos objetos apresentam uma posi-

ção angular em relação a reta  $EK$ , normal à interface ar-acrílico, maior do que a posição angular do objeto ao ser observado com o observador no meio menos denso. Dizemos então que o dioptra ar-acrílico apresenta a propriedade de refração: encurvamento do raio visual;<sup>1</sup> (2) todas as posições das imagens dos seus respectivos objetos se localizam sobre uma reta perpendicular à interface ar-acrílico que vai da posição original do objeto até essa interface; (3) todas as posições das imagens dos seus respectivos objetos se localizam sobre um arco de curva particular; (4) existe uma posição particular,  $K$ , definida pelo segmento de reta perpendicular à interface que passa pelo seu ponto médio  $E$ , onde a imagem do objeto não sofre nenhum desvio, e (5) existe uma posição limite,  $w$ , para a observação da imagem objeto. Quando ele for colocado além desse limite, não haverá condições de observação da imagem correspondente.

A partir dessas observações podemos formular a seguinte questão: Conhecida a posição angular da imagem de um objeto, podemos determinar a sua posição real? Nos dias de hoje, um observador

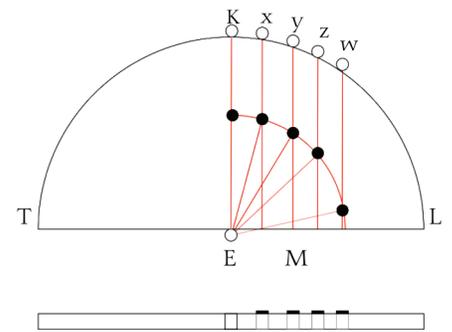


Figura 3: A imagem dos objetos (círculos opacos) e os objetos (círculos brancos) distribuídos ao redor do semicilindro. Os segmentos que partem de  $E$  são a linha de visão dos objetos pelos estudantes.

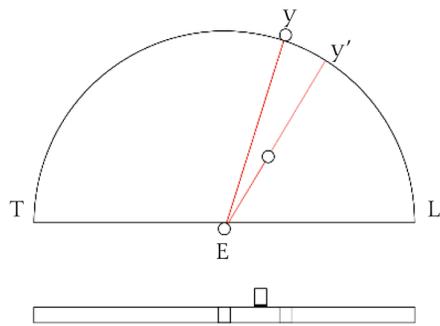
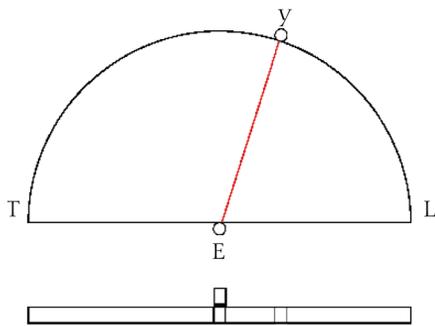


Figura 2: Processo de localização de imagens: a) colocação em  $y$  do objeto a ser visualizado; b) objeto visualizado sob o segmento  $Ey'$ ; c) imagem e objeto sob a mesma vertical.

treinado em trigonometria pode perceber da Fig. 4 que, se as dimensões do objeto observado e do objeto guia são muito menores do que as dimensões características do dioptro, ela pode ser representada como indicado na Fig. 4. Se as posições  $z$  e  $z'$  estão sobre a mesma perpendicular  $z'M$ , então podemos escrever que

$$\frac{\sin \hat{\delta}}{\sin \hat{i}} = \frac{Ez'}{Ez} = \frac{1}{k} \quad (1)$$

onde  $k$  é um parâmetro a ser determinado e  $\hat{\delta} = Kz$  e  $\hat{i} = K'z'$  são, respectivamente, a orientação angular do objeto e a da imagem.

Esse observador pode conjecturar que o arco da curva é aproximadamente um arco de circunferência e, assim, o parâmetro  $k$  é independente da localização do objeto considerado. Nesse caso, o valor de  $k$  pode ser determinado pela razão

$$\frac{EK}{EK'} = k \quad (2)$$

onde  $EK$  é o *radius verus* e  $EK'$  é o *radius apparens*. Desse modo, a posição angular do objeto,  $\hat{\delta}$ , é dada pela expressão

$$\hat{\delta} = \arcsen \left( \frac{\sin \hat{i}}{k} \right) \quad (3)$$

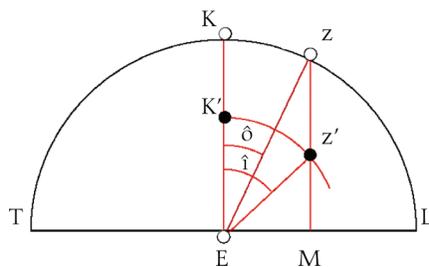


Figura 4: Representação da formação de imagens da primeira atividade: o semidisco de acrílico que representa o dioptro ar-acrílico, os pequenos cilindros e os pequenos discos pretos que servem como objeto e guia de localização, respectivamente. (a) A posição  $z'$  da imagem do objeto em  $z$ , em relação a  $EK$ , e suas orientações, estão indicadas pelos discos pretos.

Portanto, podemos concluir da Eq. (3) que, conhecendo-se o parâmetro  $k$  e a posição angular  $\hat{i}$  da imagem, a posição angular do objeto,  $\hat{\delta}$ , fica completamente determinada.

### Considerações finais

A atividade proposta é facilmente realizável e tem como objetivo a compre-

ensão do fenômeno da refração através de uma perspectiva fenomenológica envolvendo apenas a observação direta das imagens de objetos interpostos entre dois meios ópticos diferentes. Como mostrado, deduzimos a lei de Snell-Descartes para a refração com uso de geometria básica, estabelecendo uma relação angular entre os ângulos de incidência ( $\hat{\delta}$ ) e o de refração ( $\hat{i}$ ).

Deixamos de discutir o conceito de índice de refração, pois queríamos resgatar no experimento as tradições da óptica geométrica, ao nosso ver relegada ao segundo plano pelos autores de livros didáticos e por professores que se orientam por esses materiais. Para finalizar, como apontado por Feynman, a matemática colabora com a física, no que tange às inferências necessárias para a legitimação das teorias [9]. Julgamos importante que as ações didáticas levem ao estudante uma melhor compreensão das leis da física, contribuindo assim para uma melhor significação da linguagem e do processo científico.

### Notas

<sup>1</sup>É o segmento de reta que une o objeto ou sua imagem ao observador.

### Referências

- [1] C.R. Tossato, *Scientiae Studia* **3**(3), 415 (2005).
- [2] M. Martinho, *O Experimento de Ptolomeu: Uma Introdução ao Estudo da Refração Luminosa*. Dissertação de Mestrado, Mestrado Profissional em Ensino de Física, UFRJ, 2013.
- [3] B. Sant'Anna, G. Martini, H.C. Reis e W. Spinelli, *Conexões com a Física* (Editora Moderna, São Paulo, 2015), v. 2, 1ª ed.
- [4] D. Halliday, R. Resnick e J. Walker, *Fundamentos de Física - Gravitação, Ondas e Termodinâmica* (LTC, São Paulo, 2012), v. 2, 9ª ed.
- [5] M. Rodrigues e P.S. Carvalho, *Physics Education* **49**(6), 671 (2014).
- [6] P.C. Lanchester, *Physics Education* **49**(5), 532 (2014).
- [7] S.L. Wong and S.-Y. MAK, *Physics Education* **43**(2), 198 (2008).
- [8] S. Grusche and S. Wagner, *Physics Education* **51**(6), 064001 (2016).
- [9] R. Feynman. *O Que É Uma Lei Física?* (Gradiva, Lisboa, 1989).