Utilização do conceito de aumento angular para interpretar imagens observadas em espelhos esféricos côncavos

(Using the concept of angular magnification to interpret observable images in concave spherical mirrors)

V.L.B. de Jesus¹, D.G.G. Sasaki²

¹*Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio de Janeiro,
Campus Nilópolis, Nilópolis, RJ, Brasil*

²*Centro Federal Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, Maracanã, Rio de Janeiro, RJ, Brasil*

Recebido em 14/4/2012; Aceito em 9/1/2013; Publicado em 18/3/2013

Os livros didáticos de física utilizam a definição do aumento linear transversal (AL) com o objetivo de comparar o tamanho da imagem ao do objeto quando abordam espelhos e lentes esféricas. Este trabalho discute as distorções geradas pela utilização do conceito de AL e emprega o conceito de aumento angular (AA) para demonstrar que a visão do observador acerca do tamanho relativo entre o objeto e a sua imagem associada produzida por um espelho esférico côncavo depende da sua própria posição. Foi realizada uma análise qualitativa de dois experimentos, e ainda análises quantitativas e gráficas da variação do módulo do AA em função da posição do observador para os quatro tipos de imagens produzidas por um espelho côncavo. Discute-se a necessidade da introdução do conceito de aumento angular nos livros didáticos para compreender a visualização das imagens formadas por um espelho esférico côncavo.

Palavras-chave: ensino de física, espelho côncavo, aumento angular.

The physics textbooks use the definition of linear magnification (LM) in order to compare the size of the image with the object when addressing spherical mirrors and lenses. This work discusses the distortions generated by using the concept of LM and employs the angular magnification (AM) to show that the vision of the observer about to the relative size between the object and its associated image produced by concave spherical mirror depends on its own position. It was performed a qualitative analysis of two experiments, and even quantitative and graphics analysis of the modulus variation of AA as a function of the observer position for four types of images produced by a concave mirror. It is discussed the need of the introduction of the angular magnification concept in textbooks to understand the visualization of images formed by a concave spherical mirror.

Keywords: physics teaching, concave mirror, angular magnification.

1. Introdução

Os livros didáticos de Ensino Médio quando abordam espelhos e lentes esféricas definem o aumento linear transversal (AL) e classificam as imagens pela sua natureza (real ou virtual) e pelo AL [1-3]. Tal procedimento é repetido em livros didáticos de ensino superior, tanto aqueles usados para o ciclo básico [4] quanto para livros voltados para o ensino de óptica em nível mais avançado [5]. O AL pode ser um número positivo ou negativo, quando a imagem está direita ou invertida em relação ao objeto, respectivamente. Além disso, o AL pode ser maior ou menor do que 1, quando o tamanho transversal da imagem for maior ou menor do que o objeto, respectivamente.

Apesar do emprego do AL ser bem útil ao propósito

pedagógico de classificar os diferentes tipos de imagem, ele induz o aluno a confundir a formação geométrica da imagem com a sua visualização concreta. O aluno, por exemplo, após uma aula teórica sobre espelhos esféricos aprende que ao observar um objeto através de um espelho esférico côncavo irá ver a imagem associada com as mesmas características descritas nos livros. Esse equívoco já foi apontado por Silveira e cols. em um artigo onde eles estudam imagens vistas por um observador, através de um espelho esférico côncavo. Nesse trabalho, os autores tomaram como objeto o próprio olho do observador e levaram em conta o sistema de lentes do olho humano para diferenciar a imagem conjugada pelo espelho côncavo daquela que é efetivamente visualizada pelo observador [6]. Posteriormente, uma monografia de final de curso foi inteiramente baseada

¹E-mail: vitor.jesus@ifrj.edu.br.

nessas idéias e reproduziu os mesmos resultados obtidos por Silveira [7].

No presente trabalho, discutimos as deficiências e distorções geradas pela utilização do conceito de AL e empregamos o conceito de aumento angular (AA) para demonstrar que a visão do observador acerca do tamanho relativo entre o objeto e a sua imagem associada por um espelho esférico côncavo, depende da sua própria posição.

2. Análise qualitativa e experimental

O ângulo visual (α) é o ângulo subtendido entre o observador e os segmentos de reta que unem as extremidades transversais de um objeto. Considera-se a posição do observador como sendo o ponto de entrada da luz no olho. Assim sendo, o tamanho da imagem na retina é proporcional ao tamanho do objeto observado, como mostra a Fig. 1. Esse conceito é apresentado, em geral, no primeiro capítulo de óptica geométrica nos livros didáticos de Ensino Médio [1-3]. Contudo, poucos autores usam esse conceito em exemplos e/ou exercícios [1].

Figura 1 - A posição do observador é considerada como sendo o ponto de entrada da luz no olho. Então, o tamanho do objeto e da imagem formada na retina são proporcionais. Assim, simplifica-se a realização do traçado dos raios, sem incluir uma lente, que corresponderia ao sistema óptico do olho.

Relegado a um papel secundário na teoria, o conceito de ângulo visual chega a ser ignorado pelos professores, em suas aulas. Infelizmente, esse procedimento gera um prejuízo pedagógico, pois o ângulo visual é fundamental para compreender a noção de tamanho relativo de um objeto e também que as dimensões de uma imagem dependem da posição do observador. Além disso, o ângulo visual é a base para a construção do conceito de aumento angular, utilizado no estudo de lupas [8] e de outros instrumentos ópticos.

Na abordagem tradicional de lentes e espelhos esféricos, o ângulo visual e o aumento angular são completamente descartados. Em seu lugar, é utilizado o conceito de aumento linear transversal, definido pela razão entre os tamanhos transversais da imagem associada e o objeto. Contudo, essa definição é artificial e problemática, pois prescinde o observador. Esse fato induz professores e alunos ao equívoco de acreditar que todas as características da imagem são absolutas. De fato, se a imagem associada a um único espelho, plano ou esférico, for direita e virtual, assim será para qualquer outro observador, mas o seu tamanho em relação

ao objeto evidentemente depende da posição do observador.

Por exemplo, quando uma pessoa observa simultaneamente um objeto e sua imagem associada através de um espelho plano, ela vê a imagem menor do que o objeto, pois ela se encontra a uma distância maior de seus olhos. Isso é facilmente compreendido usando os conceitos de ângulo visual e de aumento angular. Porém, os livros didáticos ensinam que a imagem do espelho plano tem o mesmo tamanho do objeto, pois classificam as imagens através do conceito de aumento linear transversal (AL), cujo valor independe da posição do observador. Essa diferença entre aquilo que o observador enxerga e o valor do AL é fruto da artificialidade desse conceito e provoca um equívoco didático grave.

Outra situação onde fica claro esse tipo de erro está ilustrada na Fig. 2. Um objeto é colocado entre o foco e o vértice de um espelho esférico côncavo, sobre o seu eixo principal. Esse caso clássico é apresentado no corpo do texto ou nos exemplos de todos os livros didáticos de Ensino Médio. Os raios principais são desenhados, a imagem é construída e mesmo antes de efetuar os cálculos, conclui-se pelo desenho que a imagem é virtual, direita e maior do que o objeto. Se forem substituídos os valores da posição do objeto $p = 25$ cm e da distância focal $f = 50$ cm, nas equações de Gauss dos pontos conjugados e do aumento linear transversal, obtém-se a posição da imagem $p' = -50$ cm e $AL = 2$, corroborando a impressão qualitativa anterior.

Figura 2 - Objeto colocado entre o vértice e o foco do espelho na posição $p = 25$ cm. A distância focal (f) é 50 cm e o observador está sobre o eixo principal na posição $x = 50$ cm. A imagem é virtual, direita e localizada no ponto $p' = -50$ cm. A imagem tem um Aumento Linear Transversal (AL) igual a 2, mas nota-se claramente que o ângulo visual da imagem é menor do que o ângulo visual do objeto.

Porém, tal conclusão é enganosa, pois uma imagem virtual não pode ser projetada nem medida, sendo apenas observada. Assim, colocando-se um observador na posição $x = 50$ cm sobre o eixo principal, este não verá uma imagem duas vezes maior como “previsto” pelo AL, mas ao contrário verá uma imagem duas vezes me-

nor, pois o ângulo visual da imagem é a metade do ângulo visual do objeto.

Os professores e alunos simplesmente ignoram esse fato, pois em geral não existem laboratórios de física nas escolas. Essa lacuna experimental colabora para perpetuar o erro proveniente de uma análise exclusivamente abstrata e embasada no conceito de AL que distorce a realidade, ao desprezar o papel do observador na construção das imagens.

Se mantivermos a mesma configuração espacial de espelho e objeto do exemplo anterior, mas modificarmos apenas a posição do observador para $x = 100$ cm haverá novamente uma divergência entre a realidade observada e o valor do AL. Tal situação está ilustrada na Fig. 3. O valor de AL permanece 2, pois independe do observador. Todavia, o observador vê a imagem com o tamanho igual ao do objeto, pois eles estão agora, sob o seu ponto de vista, com o mesmo ângulo visual.

Figura 3 - Objeto colocado entre o vértice e o foco do espelho na posição $p = 25$ cm. A distância focal (f) é 50 cm e o observador está sobre o eixo principal na posição $x = 100$ cm. A imagem é virtual, direita e localizada no ponto $p' = -50$ cm. A imagem tem um Aumento Linear transversal (AL) igual a 2, mas nota-se claramente que o ângulo visual da imagem é equivalente ao ângulo visual do objeto.

Com o intuito de verificar na prática essa discrepância, foram executados dois experimentos que reproduzem as situações ilustradas acima. Os equipamentos necessários foram cedidos pelo laboratório didático de física do IFRJ, instituição onde leciona um dos autores.

Como os espelhos didáticos são de diâmetro muito pequeno, foi adquirido no comércio um espelho esférico côncavo grande para obter um campo visual maior, cuja distância focal nominal é $f = 50$ cm. Com o objetivo de verificar a distância focal do espelho, foi montado um banco óptico para a realização de medidas da posição do objeto (p), representada por uma pequena fonte de luz em forma de cruz, e da imagem real associada (p'), projetada em um semi-anteparo. Foram efetuadas cinco medições diferentes da posição do objeto e sua imagem conjugada, considerando suas respectivas incertezas. A partir do gráfico $1/p' \times 1/p$ foi obtido o valor da distância focal (que corresponde ao inverso do coeficiente linear da função do primeiro grau) como sendo $50,3 \pm 0,8$ cm.

Usando um banco ótico, uma régua milimetrada, o espelho esférico côncavo grande, uma vela e uma máquina fotográfica digital, montou-se o arranjo experimental mostrado na Fig. 4. Foi tomado o cuidado de manter a vela (objeto) e a máquina fotográfica (observador) alinhados sobre o eixo principal do espelho côncavo.

Figura 4 - Configuração do experimento. O espelho esférico côncavo está localizado na extremidade superior da foto, sobre a mesa. A vela acesa está sobre uma armação de palitos, encostada no banco ótico, onde corre paralela uma régua milimetrada. Na extremidade inferior da foto, a máquina fotográfica, que faz o papel de observador, está apoiada sobre o banco ótico e escorada por uma pilha de pesos.

Foram tiradas duas fotos. Em ambas, a vela acesa estava posicionada em $p = 25$ cm e a distância focal do espelho é $f = 50$ cm. Na primeira delas, a máquina fotográfica (observador) estava sobre o banco ótico na posição $x = 50$ cm (Fig. 5). Pelas equações de Gauss, a imagem é virtual, direita, a sua posição é $p' = -50$ cm e o seu AL = 2.

Figura 5 - Reprodução experimental da Fig. 2. A vela acesa (objeto) está colocada entre o vértice e o foco do espelho na posição $p = 25$ cm. A máquina fotográfica (observador) está sobre o eixo principal na posição $x = 50$ cm. O aumento linear transversal (AL) da imagem vale 2. Porém, percebe-se que a imagem fotografada é duas vezes menor do que o objeto.

Diante dessa experiência, se alunos e até mesmo professores fossem perguntados sobre como a imagem da vela acesa seria visualizada, eles responderiam de forma unânime que veriam a imagem da vela maior do que ela mesma. Talvez eles até “provassem” as suas afirmações usando a equação de Gauss para o aumento linear transversal. Entretanto, ao colocarem seus olhos junto à máquina fotográfica ficariam surpresos ao enxergar a imagem com a metade do tamanho do objeto.

Na segunda foto, a máquina fotográfica (observador) está na posição $x = 100$ cm (Fig. 6). Como não houve alteração nos outros parâmetros, mais uma vez seria esperada uma imagem da vela com o dobro do tamanho do objeto ($AL = 2$). Em vez disso, fica claro que tanto a vela quanto a sua imagem são visualizados com o mesmo tamanho.

Figura 6 - Reprodução experimental da Fig. 3. A vela acesa (objeto) está colocada entre o vértice e o foco do espelho na posição $p = 25$ cm. A máquina fotográfica (observador) está sobre o eixo principal na posição $x = 100$ cm. O aumento linear transversal (AL) da imagem vale 2. Porém, percebe-se que a imagem fotografada tem o mesmo tamanho do objeto.

A introdução do conceito de aumento angular (AA) paralelamente ao de aumento linear transversal (AL) na análise das imagens oriundas de espelhos proporciona uma compreensão correta das dimensões relativas entre a imagem e o objeto. Isso ocorre porque o aumento angular leva em conta a posição do observador e, portanto, fornece um resultado coerente com a realidade observada.

3. Análise quantitativa e gráfica

Para uma imagem conjugada por um espelho esférico côncavo, nas condições de nitidez de Gauss, definimos o aumento angular

$$AA = \frac{tg\beta}{tg\alpha}, \quad (1)$$

onde β é o ângulo visual da imagem associada e α é o ângulo visual do objeto, ambos medidos em relação à

posição do observador.

Essa definição é operacional somente quando o objeto e a imagem estão simultaneamente a uma distância do observador igual ou maior do que o ponto próximo (em geral, 25 cm para um olho “normal”), condição para que haja nitidez por parte do observador.

Supondo uma configuração genérica de objeto e imagem conjugada (Fig. 7), especificamos os seguintes parâmetros: p (posição do objeto no eixo principal em relação ao vértice), p' (posição da imagem no eixo principal em relação ao vértice), x (posição do observador no eixo principal em relação ao vértice), i (tamanho linear da imagem), o (tamanho linear do objeto) e f (distância focal).

Figura 7 - Elementos geométricos de um espelho esférico côncavo, ilustrados numa situação onde o objeto está localizado sobre o ponto p , entre o foco e o vértice (V). A imagem é virtual, localizada sobre o ponto p' , e o observador está numa distância x do vértice, sobre o eixo principal. Foi utilizada a convenção de sinais de Gauss.

Aplicando a convenção de sinais de Gauss à Fig. 7, obtemos que

$$tg\alpha = \frac{y}{x-p} \quad \text{e} \quad tg\beta = \frac{y'}{x-p'}. \quad (2)$$

Logo, inserindo a Eq. (2) na Eq. (1), concluímos que

$$AA = \frac{y'}{y} \frac{x-p}{x-p'}. \quad (3)$$

Substituindo a equação do aumento linear transversal $AL = \frac{y'}{y} = \frac{-p'}{p}$ na Eq. (3), obtemos

$$AA = \left(\frac{-p'}{p} \right) \frac{x-p}{x-p'} = \left(\frac{-p'}{p} \right) \frac{p \left(\frac{x}{p} - 1 \right)}{-p' \left(1 - \frac{x}{p'} \right)} = \frac{\left(\frac{x}{p} - 1 \right)}{\left(1 - \frac{x}{p'} \right)}. \quad (4)$$

Utilizando a equação dos pontos conjugados $\frac{1}{f} = \frac{1}{p} + \frac{1}{p'}$ e isolando p' , obtemos

$$\frac{1}{p'} = \frac{p-f}{pf}. \quad (5)$$

Substituindo a Eq. (5) na Eq. (4), concluímos que

$$AA = \frac{\frac{x}{p} - 1}{1 - \left(\frac{p-f}{fp}\right)x}. \quad (6)$$

A Eq. (6) é uma expressão geral para o aumento angular (AA) produzido por um espelho esférico côncavo, em função da distância focal e das posições do objeto e do observador, ambas medidas em relação ao vértice do espelho, sobre o eixo principal. O aumento angular pode ser um número negativo quando a imagem está invertida em relação ao objeto. Contudo, nas nossas análises tomamos o seu módulo, pois nosso interesse está apenas na ampliação ou na redução da imagem em relação ao objeto, quando se varia a posição do observador.

Em geral, os espelhos esféricos didáticos possuem uma distância focal entre 5,0 cm e 20 cm. Em nosso modelo teórico, consideramos um espelho côncavo de distância focal 50 cm e escolhemos valores arbitrários para a posição do objeto, entre 25 cm e 125 cm. Substituímos esses valores na equação (6) e construímos os gráficos do módulo do AA em função da distância x do observador ao vértice do espelho, para os quatro casos de imagem possíveis produzidas por um espelho esférico côncavo, descritos nos livros didáticos de Ensino Médio: objeto colocado entre o vértice e o foco do espelho côncavo (Fig. 8), entre o foco e o centro de curvatura (Fig. 9), no centro de curvatura (Fig. 10) e, finalmente, além do centro de curvatura (Fig. 11).

Nos gráficos apresentados nas Figs. 8, 9, 10 e 11, algumas áreas são destacadas. A região hachurada em diagonal crescente está centrada na posição do objeto e delimita a distância mínima de observação do objeto, tomando como referência do ponto próximo o valor de 25 cm. Dentro dessa região, o observador não consegue enxergar com nitidez. A região hachurada em diagonal decrescente está à direita da posição da imagem e delimita a distância mínima de observação da imagem, tomando como referência o mesmo valor de ponto próximo anterior. Finalmente, a região hachurada na horizontal demarca a região onde as imagens reais ainda não estão formadas e, consequentemente, um observador colocado dentro dessa região não teria uma visão nítida dessas imagens.

A Fig. 8 mostra o gráfico do módulo do AA em função da posição do observador (x) para um objeto colocado na posição $p = 25$ cm, portanto no ponto médio da distância entre o foco e o vértice do espelho. Pelas equações de Gauss, a imagem é virtual, direita, a sua posição é $p' = -50$ cm e o seu $AL = 2$. Porém, o gráfico

mostra que até uma distância $x < 100$ cm do vértice do espelho, o observador visualiza uma imagem de tamanho menor do que o objeto. Por exemplo, quando o observador se coloca na posição $x = 50$ cm, ele verifica que a imagem possui metade do tamanho do objeto, como descrito nas Figs. 2 e 5. Em $x = 100$ cm, a imagem torna-se do mesmo tamanho do que o objeto, como já mostrado nas Figs. 3 e 6. Apenas para distâncias superiores a 100 cm, o observador enxerga a imagem maior do que o objeto, mas ainda bem inferior ao dobro do tamanho, como “previsto” pelo AL.

Figura 8 - Objeto colocado entre o vértice e o foco do espelho. O $AL = 2$, mas o AA possui valores menores do que 1 para o observador a uma distância inferior a 100 cm. Entre 100 cm e 300 cm, a imagem é vista maior do que o objeto, mas ainda não atinge o dobro do valor.

A Fig. 9 exibe o gráfico do módulo de AA em função da posição do observador (x) para o objeto colocado na posição $p = 75$ cm, portanto entre o foco e o centro de curvatura do espelho. Pelas equações de Gauss, a imagem é real, invertida, a sua posição é $p' = 150$ cm e o seu $AL = -2$. Porém, o comportamento do AA é bem distinto. Até uma distância $x < 175$ cm do vértice do espelho, o observador não consegue enxergar nitidamente a imagem e o objeto, simultaneamente. Dentro dessa região, a despeito da nitidez, para x maiores do que 75 cm (posição do objeto), a curva mostra um AA crescente e no limite quando x tende a 150 cm (posição da imagem) o AA tende para infinito. Para $x > 175$ cm, o AA é decrescente, mas ainda assim bem maior do que 2, indicando que o observador pode ver a imagem com tamanho mais do que 5 vezes superior ao do objeto, desde que ela caiba em seu campo visual.

No gráfico mostrado na Fig. 10, o objeto é colocado na posição $p = 100$ cm, portanto no centro de curvatura do espelho. Pelas equações de Gauss, a imagem é real, invertida, a sua posição é $p' = 100$ cm e o seu $AL = -1$. Esse é o único caso onde o AL e o AA coincidem. Como o AL é constante, nesse caso o AA também é constante, isto é, não depende da posição do observador. Isso ocorre porque tanto a imagem quanto

o objeto estão localizados sobre o mesmo ponto que é o centro de curvatura do espelho. Sendo assim, para qualquer posição do observador, o objeto e a imagem sempre terão o mesmo ângulo visual.

Figura 9 - Objeto colocado entre o foco e o centro de curvatura do espelho. O $AL = 2$, mas para $x < 175$ cm, o observador não vê com nitidez a imagem e o objeto, simultaneamente. Em $x > 75$ cm, a curva mostra um AA crescente que tende para infinito em $x = 150$ cm. Depois o AA decresce, mas ainda é bem maior do que 2.

Figura 10 - Objeto colocado no centro de curvatura do espelho. Esse é o único caso onde o AL e o AA coincidem. Isso ocorre porque tanto a imagem quanto o objeto estão localizados sobre o mesmo ponto que é o centro de curvatura do espelho. Sendo assim, para qualquer posição do observador, o objeto e a imagem sempre terão o mesmo ângulo visual.

Finalmente, o gráfico mostrado na Fig. 11, mostra o AA para o objeto colocado na posição $p = 125$ cm, portanto além do centro de curvatura do espelho. Pelas equações de Gauss, a imagem é real, invertida, a sua posição é $p' = 83,3$ cm e o seu $AL = -0,67$. Até uma distância $x < 150$ cm do vértice do espelho, o observador não consegue ver com nitidamente a imagem e o objeto, simultaneamente. Dentro dessa região sem condições de nitidez, para $x < 83,3$ cm (posição da

imagem), a curva mostra um AA crescente e no limite quando x tende a $83,3$ cm o AA tende para infinito. Para $83,3 < x < 125$ cm, o AA é decrescente e atinge o valor nulo em $x = 125$ cm (posição do objeto). Para $x > 125$ cm, o AA cresce bem lentamente e tende assintoticamente ao valor do AL.

Figura 11 - Objeto colocado além do centro de curvatura do espelho. O $AL = 0,67$, mas para $x < 150$ cm, o observador não vê com nitidez a imagem e o objeto, simultaneamente. Para $x > 125$ cm, a curva mostra um AA com crescimento lento e tendendo, assintoticamente, ao valor de AL.

Da análise comparativa entre os gráficos mostrados nas Figs. 8, 9, 10 e 11, algumas observações ficam evidentes:

1. O AA varia, ao contrário do AL que é constante. O AA depende da posição do observador, exceto quando o objeto está no centro de curvatura. Nesse caso, AA e AL são constantes e valem 1.
2. O AA nos casos mostrados nas Figs. 9 e 11 possuem singularidades, quando a posição do observador coincide com a posição da imagem.
3. Nas regiões não hachuradas, onde tanto objeto quanto imagem são nítidos para o observador, o AA e o AL não fornecem o mesmo valor, exceto no caso mostrado na Fig. 10. A discrepância entre os valores do AA e do AL é significativa em todos os outros casos e são de maior magnitude no gráfico mostrado na Fig. 9, devido à singularidade na posição da imagem.
4. Nas regiões não hachuradas, onde tanto objeto quanto imagem são nítidos para o observador, apesar das discrepâncias quantitativas citadas no item anterior, tanto o AA quanto o AL coincidem quanto à classificação qualitativa da imagem como maior ou menor do que objeto, exceto no caso gráfico da Fig. 8.

5. O caso mostrado na Fig. 8 é o mais crítico da divergência entre o AA e o AL, pois além da diferença de magnitude entre eles, existe uma classificação da imagem contraditória entre esses dois conceitos na região $x < 100$ cm. Nessa faixa, o AL aponta uma imagem maior do que o objeto e o AA uma imagem menor.

4. Conclusões

A classificação das imagens produzidas por espelhos esféricos através da definição do aumento linear é interessante do ponto de vista pedagógico, mas reflete a ênfase excessivamente formal e teórica do ensino de óptica geométrica que despreza a posição do observador. Quando o aluno toma contato com um espelho côncavo numa aula de laboratório de física, coloca um objeto na frente do espelho e observa, em diferentes posições, as imagens associadas, existe um conflito entre aquilo que ele enxerga e a classificação das imagens apresentadas nos livros. Mostramos a necessidade da introdução do conceito de aumento angular nos livros didáticos de Ensino Médio para compreender a visualização das imagens formadas por um espelho esférico côncavo.

Agradecimentos

O autor V.L.B. de Jesus é Bolsista do Programa Institucional de Bolsa de Iniciação à Docência – PIBID,

da CAPES – Brasil. Ao IFRJ, pela cessão do seu laboratório didático e alguns equipamentos para a realização dos experimentos descritos neste artigo.

Referências

- [1] A. Gaspar, *Física*, Vol. 2 (Editora Ática, São Paulo, 2003).
- [2] B. Alvarenga e A. Máximo, *Física*, Vol. 2 (Scipione, São Paulo, 2007).
- [3] F. Ramalho Júnior, N.G. Ferraro e P.A.T. Soares, *Os Fundamentos da Física*, Vol. 2 (Editora Moderna, São Paulo, 2007).
- [4] D. Halliday, R. Resnick e J. Walker, *Fundamentos de Física*, Vol. 4 (Editora LTC, Rio de Janeiro, 2009).
- [5] E. Hecht, *Óptica* (Ed. Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa, 2002).
- [6] F.L. Da Silveira, R. Axt e M.A. Pires, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **26**, 19 (2004).
- [7] G.M.S. Lelis e L. Cescato, *O que Vemos quando nos Olhamos para um Espelho Côncavo?* Relatório final, IFGW, Unicamp, 2006.
- [8] E.V. Costa e R. Bruno, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **20**, 428 (1998).