Refração da Luz em Superfícies Curvas: Lentes

Nesta prática, continuaremos a explorar a ótica geométrica estudando lentes delgadas convergentes e divergentes.

Sempre que surgir uma dúvida quanto à utilização de um instrumento, o aluno deverá consultar o professor, o monitor ou o técnico do laboratório para esclarecimentos.

I. Lentes esféricas convergentes e divergentes

Uma lente esférica é composta por um material com índice de refração diferente do meio que o circunda, delimitado por duas superfícies esféricas (ou planas, em alguns casos). Vamos nos restringir ao caso de lentes delgadas (cuja espessura é muito menor do que a distância focal). Devido à diferença de curvatura entre as faces, o raio de luz sofre um desvio. Um feixe de luz paralelo, ao atingir a lente, se transforma em um feixe cônico, que pode ser convergente ou divergente. No primeiro caso, diz-se que a lente é convergente, e no segundo caso diz-se que é divergente. A distância entre a lente e o vértice do cone é chamada de distância focal.

II. Distância focal de uma lente (equação dos fabricantes)

Quando estudamos espelhos, relacionamos a distância focal às propriedades geométricas (raio de curvatura). Faremos o mesmo para as lentes esféricas delgadas. Assim como no caso do espelho, nos limitaremos a raios paraxiais (próximos ao eixo óptico).

A figura 1 mostra uma representação de uma lente delgada com duas faces convexas (em relação ao meio externo). Para facilitar a compreensão do desenho A espessura da lente está exagerada e os raios de curvatura estão das duas faces estão representados muito menores que raios de curvaturas de lentes típicas. Os centros de curvatura são C_1 e C_2, para a primeira e a segunda face, respectivamente. Um raio que incide paralelamente ao eixo óptico (a uma distância h deste) cruza esse eixo no foco (ponto F); a distância focal é a distância VF, onde V é o vértice da lente.

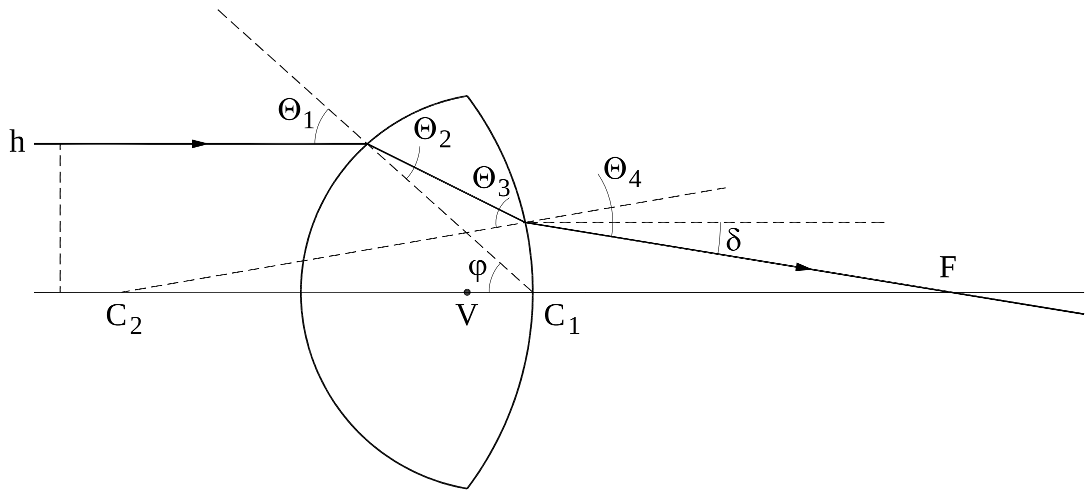

Figura 1 – Dedução da equação dos fabricantes

O ângulo de incidência na primeira face é dado por:

$$\theta_1 \approx \sin\theta_1 = \frac{h}{R_1} \tag{1}$$

A aproximação é possível porque estamos considerando que a distância h do raio ao eixo óptico é suficientemente pequena em comparação com o raio de curvatura. Pela lei de Snell:

$$\theta_2 \approx \sin\theta_2 = \frac{1}{n}\sin\theta_1 \approx \frac{1}{n}\theta_1 \tag{2}$$

Para calcular θ_3, observamos que os ângulos θ_2, θ_3 e o ângulo formado pelo encontro das normais às duas faces (φ) formam um triângulo, e as normais também formam um triangulo junto com o eixo óptico. Portanto:

$$\theta_3 = \pi - \theta_2 - \varphi \tag{3a}$$

$$\varphi = \pi - \frac{h}{R_1} - \frac{h}{R_2} \tag{3b}$$

Combinando essas equações, obtemos θ_3:

$$\theta_3 = h\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right) - \frac{1}{n}\frac{h}{R_1} \tag{4}$$

A lei de Snell aplicada à segunda refração fornece:

$$\theta_4 \approx \sin\theta_4 = n\sin\theta_3 \approx n\theta_3 \tag{5}$$

Na figura, vemos que o desvio total sofrido pelo feixe é igual a θ_4 menos o ângulo formado pela normal à segunda face e o eixo óptico:

$$\delta = \theta_4 - \frac{h}{R_2} = nh\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right) - \frac{h}{R_1} - \frac{h}{R_2} = (n-1)h\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right) \tag{6}$$

O raio refletido faz um ângulo δ com o eixo óptico e sai da lente a uma distância h deste (desprezamos a variação ocorrida dentro da lente, devido à hipótese de que ela é delgada), e cruzará o eixo óptico a uma distancia f da lente tal que:

$$\delta \approx \tan\delta = \frac{h}{f} \tag{7}$$

Podemos agora combinar as equações 6 e 7 para chegar a:

$$\frac{1}{f} = (n-1)\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right) \tag{8}$$

A equação 8 é conhecida como equação dos fabricantes de lentes, porque permite calcular a distância focal em função dos parâmetros geométricos e do material, e assim poder projetar lentes para ter a distância focal desejada.

Nossa dedução foi feita para duas faces convexas, mas o mesmo argumento também pode ser aplicado para faces côncavas ou planas. No primeiro caso, o raio de curvatura deve ser considerado negativo, e no segundo caso deve ser considerado infinito.

III. Determinação da imagem formada por uma lente esférica (método geométrico)

Para determinar a imagem formada por uma lente, precisamos traçar os raios de luz que saem de um ponto e verificar onde eles se encontrarão. Existem alguns raios que são fáceis de saber como serão refratados:

- O raio que incide na lente descrevendo uma trajetória paralela ao eixo ótico é refletido de forma a passar pelo foco.
- O raio focal, que incide na lente passando pelo foco, é refletido paralelamente ao eixo ótico. Essa situação é oposta à primeira, e deriva do principio da reversibilidade dos raios de luz.
- O raio que incide sobre o vértice da lente a atravessa sem sofrer desvio.

A imagem de cada ponto é formada no ponto de encontro de quaisquer dois desses raios. A imagem pode ser real (quando os raios realmente se cruzam) ou virtual (quando apenas os prolongamentos dos raios se cruzam).

As figuras a seguir mostram o método aplicado a uma lente convergente e outra divergente. No primeiro caso, a imagem é real, e no segundo caso a imagem é virtual.

(a) (b)

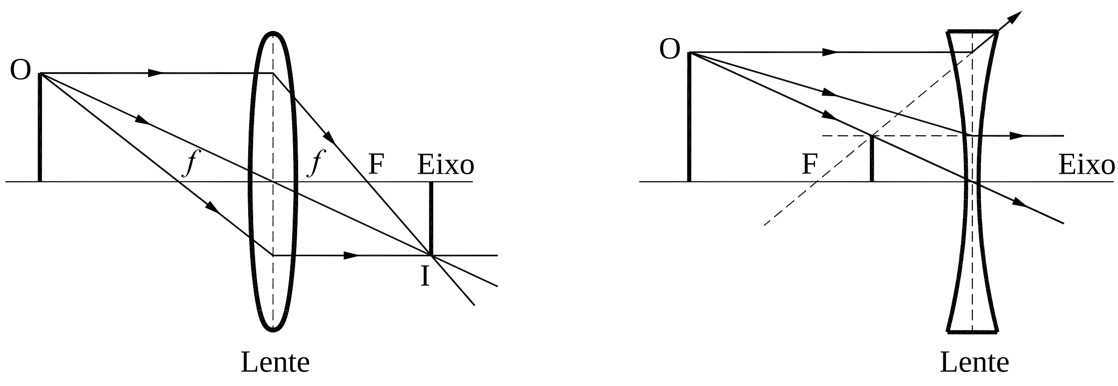

Figura 2 – Formação de imagem em lentes. (a) Lente convergente. (b) Lente divergente

IV. Determinação da imagem formada por uma lente esférica (método algébrico)

Quando estudamos os espelhos esféricos, vimos que há duas equações que determinam a posição e o tamanho da imagem formada pelo espelho:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{s} + \frac{1}{s'} \tag{9a}$$

$$\frac{o'}{o} = -\frac{s'}{s} \tag{9b}$$

Essas mesmas equações também podem ser usadas no caso de lentes, mas algumas modificações devem ser feitas. No caso de espelhos, o objeto e a imagem (real) se situam do mesmo lado do espelho, e os eixos s e s' são no mesmo sentido. No caso de lentes, o objeto e a imagem (real) ficam em lados opostos da lente, portanto os eixos s e s' devem ser medidos em direções opostas. A convenção de sinais é:

Tabela 1: Convenção de sinais para lentes esféricos.

Parâmetro	**Sinal positivo**	**Sinal negativo**
Foco (f)	Lente convergente	**Lente divergente**
Distância do objeto (s)	Objeto real	–
Distância da imagem (s')	Imagem real (no lado oposto ao do objeto)	**Imagem virtual (no mesmo lado do objeto)**
Tamanho do objeto (o)	Objeto	–
Tamanho da imagem (o')	**Imagem direita**	**Imagem invertida**

V. Tipos de imagens formadas

Assim como no caso do espelho côncavo, a lente convergente também pode formar diferentes tipos de imagem conforme a posição do objeto.

a) Objeto após o foco ($s > f$). Nesse caso, $s' > 0$ e $o' < 0$. A imagem é real e invertida. Será ampliada se $s > 2f$ (Figura 3a) e reduzida se $f < s < 2f$ (Figura3b).

b) Objeto entre a lente e o foco ($s < f$). Nesse caso, $s' < 0$ e $o' > o > 0$. A imagem é virtual, direita e ampliada (Figura 3c).

c) Objeto sobre o foco ($s = f$). Nesse caso, s' vai a infinito. Todos os raios são refratados paralelamente e não há formação de imagem.

Com lentes divergentes, a imagem será sempre virtual, direita e reduzida, da mesma forma que ocorre com espelhos convexos.

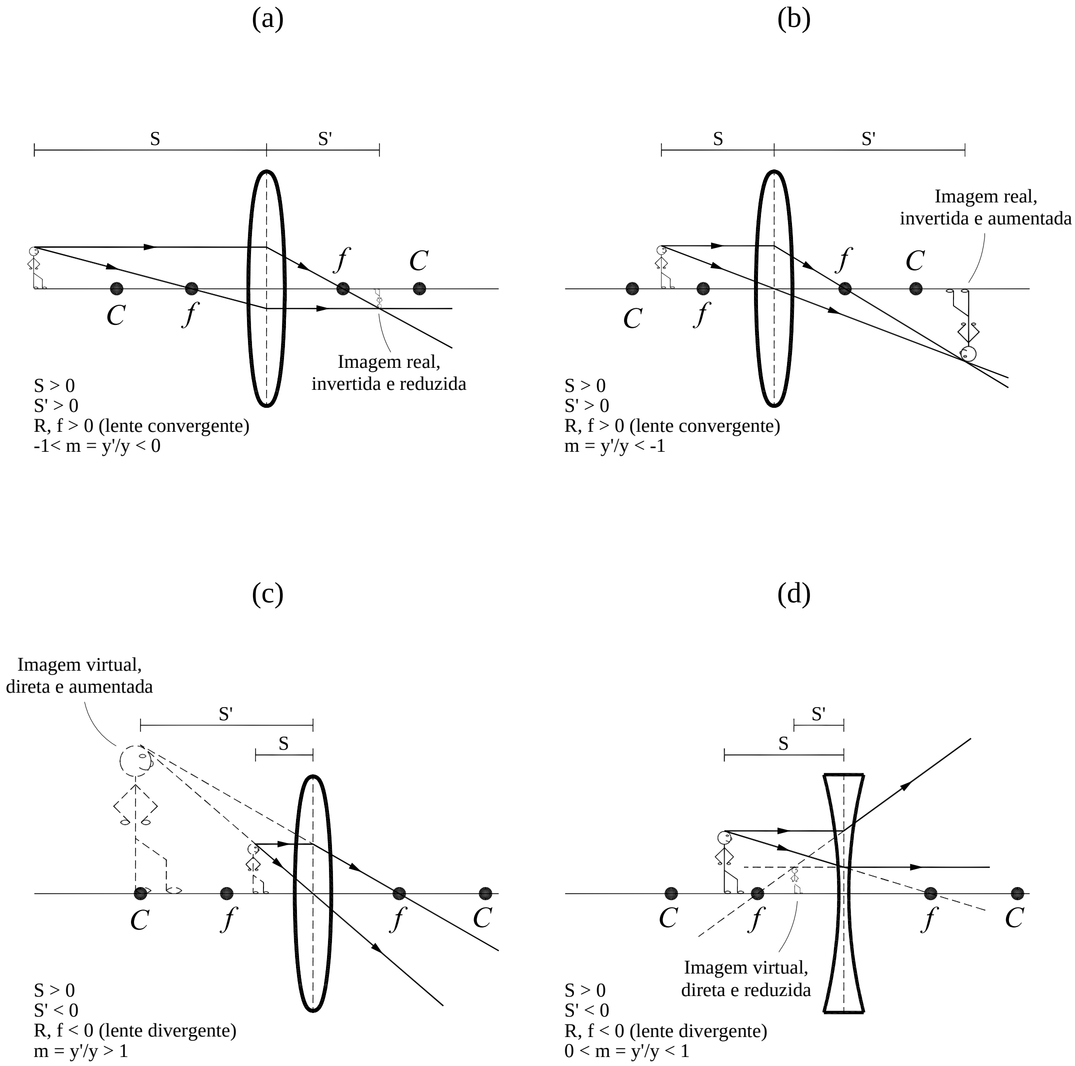

Figura 3 – Imagens formadas por lentes delgadas. Objeto localizado (a) antes do centro de curvatura de uma lente convergente; (b) entre o foco e o centro de curvatura; (c) entre o foco e o vértice de uma lente convergente; (d) Entre o foco e o centro de curvatura de uma lente divergente.

Experimentos

Importante: Neste experimento será utilizado um laser. Cuidado para não direcioná-lo para seu próprio olho ou para o olho dos demais em sala!!!

1. Medida da distância focal de uma lente convergente

Neste experimento, vamos determinar a distância focal de uma lente convergente.

a) Antes de realizar os experimentos é crucial que o feixe de luz laser esteja alinhado com relação ao trilho óptico. Para fazer o alinhamento, você deve utilizar os pinos de pesquisa disponíveis em sua bancada. Um pino de pesquisa é constituído por um arame metálico fino solidário a um poste de sustentação. Coloque um pino de pesquisa (pino A) no centro de articulação do trilho óptico. Mova o laser lateralmente (utilize o parafuso de ajuste do cavalete de sustentação do laser) até que o feixe intercepte o pino A. Coloque um segundo pino de pesquisa (pino B) em um cavalete e posicione-o entre o laser e o centro de articulação do trilho. Desloque o pino B lateralmente até que o feixe de luz laser o intercepte. Mova o pino B ao longo do trilho óptico e verifique se o feixe continua a interceptá-lo (independentemente de sua posição). Se isso ocorrer o feixe está alinhado com o trilho; caso contrário, você deverá mover o laser lateralmente ou rotacioná-lo em torno do seu poste de sustentação até que o alinhamento seja alcançado. *Atenção: Uma vez que o feixe esteja alinhado, não mexa mais no laser (ou em seu suporte) durante todos os experimentos. Caso ocorra o desalinhamento do feixe durante o experimento, você terá que realizar todo o procedimento de alinhamento novamente.*

b) Nos experimentos a seguir também necessitaremos de dois feixes luminosos paralelos entre si, que serão usados para estudar os desvios em suas trajetórias provocados pelas superfícies refratoras. Para obter esses dois feixes a partir de uma única fonte de luz laser, utilizaremos o dispositivos mostrado na figura 4 . O mesmo é constituído por um semi-espelho (50% de reflexão) que produz dois feixes à partir da reflexão e transmissão do feixe incidente.

Após a divisão do feixe do laser pelo semi-espelho, a parte refletida do feixe incide em um espelho plano (100 % de reflexão) cuja função é redirecioná-lo de modo que fique paralelo ao feixe transmitido através do semi-espelho.

c) Coloque o conjunto espelho e semi-espelho (planos) em um cavalete com ajuste lateral, posicionando-o no trilho de modo que o feixe de luz laser atravesse o semi-espelho. Certifique-se que após passar pelo semi-espelho o feixe transmitido continua alinhado com o trilho óptico. Certifique-se também que o feixe refletido esteja aproximadamente perpendicular ao feixe incidente. Caso não esteja utilize os parafusos micrométrico do suporte do semi-espelho para conseguir essa condição. Alinhe o espelho 100% de modo que o feixe refletido pelo semi-espelho siga uma trajetória paralela na mesma altura que o feixe transmitido. Dica: certifique-se que de fato os dois feixes estão paralelos, para isso, com o auxílio de uma folha de papel, siga ambos os feixes por alguns metros, confirmando que em nenhum momento esses se cruzam.

d) Coloque uma lente convergente em um suporte óptico que possua parafusos micrométricos que permitem ajustar a sua orientação. Posicione o conjunto no trilho óptico de modo que o feixe de referência (feixe transmitido pelo semi-espelho) incida aproximadamente no centro da mesma (vértice da lente). Para obter essa situação, você pode mover lateralmente e verticalmente o suporte da lente. Dica: mantenha um pino de pesquisa (previamente alinhado com respeito ao trilho óptico) após a lente, de modo que o ajuste inicial da posição da lente se baseie no fato de que o raio de luz que passa pelo vértice da lente deve posteriormente atingir o pino de pesquisa. Feito isso, faça um ajuste fino da posição da lente utilizando os parafusos micrométricos do suporte, ajustando a lente de modo que o feixe de referência reflita sobre si mesmo (retro-reflexão).

e) Em sua bancada existe um suporte onde se encontra fixa uma pequena régua transparente. Coloque-o em um cavalete e posicione-o atrás da lente conforme mostrado na figura 4. Translade o conjunto ao longo do trilho e observe a posição em que o feixe de referência (feixe transmitido pelo semi-espelho) coincide espacialmente com o feixe lateral (feixe refletido pelo semi-espelho). Esse ponto é o ponto focal, e a distância entre esse ponto e o centro da lente é a distância focal. Meça esse valor.

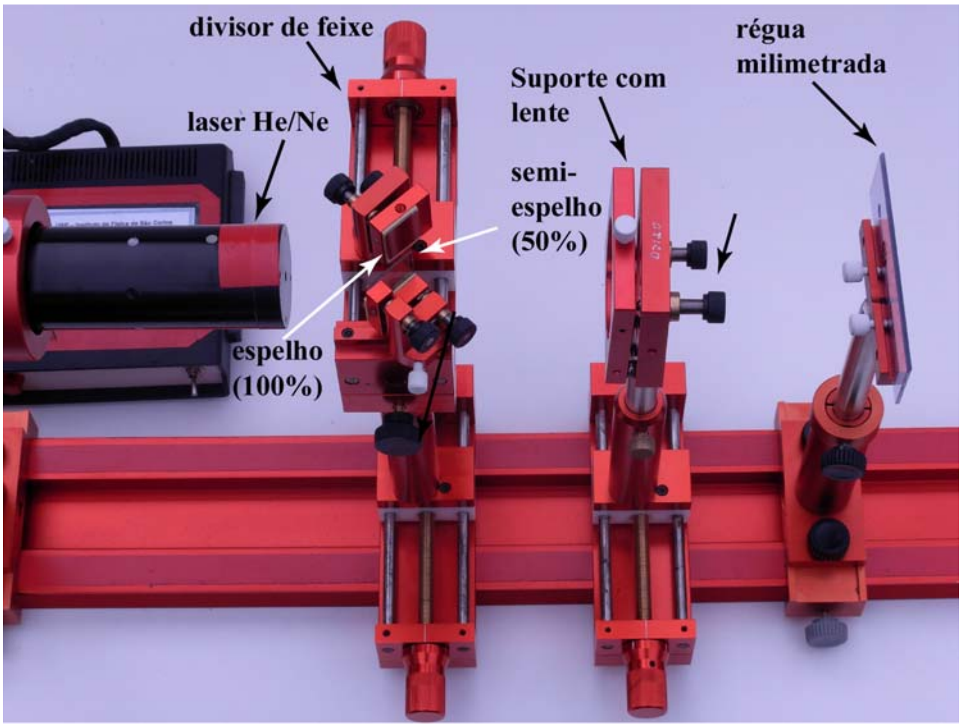

Figura 4 –Fotografia da montagem experimental, mostrando, da direita para a esquerda, o laser, o divisor de feixes, o suporte com a lente e a régua transparente.

f) Podemos ainda determinar o raio de curvatura de cada uma das faces da lente convergente através da seguinte expressão (deduza essa expressão no seu relatório):

$$R = \frac{2a}{b} L \tag{10}$$

Como mostrado na figura 5, a é a distância entre o feixe de referência e o feixe lateral; L é a distância entre a régua e a lente; b é a distância~~,~~ medida na régua transparente, entre o feixe lateral incidente e o refletido na primeira superfície da lente. É importante lembrar que também há raios refletidos na segunda superfície da lente. Para diferenciar a origem do feixe refletido (primeira ou segunda superfície da lente) e corretamente medir b, repare que o raio refletido pela primeira superfície não se encontra com o feixe lateral em nenhuma posição, enquanto que o raio refletido pela segunda superfície encontra-se.

g) Faça 3 medidas distintas de a, b e L para uma das faces da lente e determine o raio de curvatura desta face utilizando a equação 10.

h) Gire o suporte da lente de 180º de modo que o laser incida na outra face. Repita todo o procedimento descrito anteriormente e determine o raio de curvatura da segunda face utilizando novamente a equação 10.

i) Com os resultados dos itens g e h e o índice de refração do vidro de 1,51, utilize a equação 8 para determinar a distância focal *f* da lente. Compare o resultado com a medida direta realizada no item e.

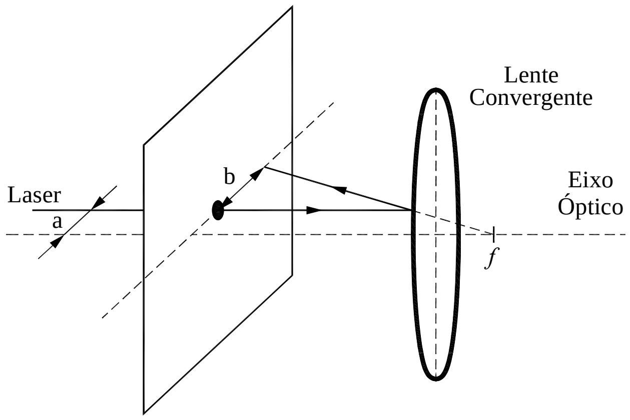

Figura 5 – Montagem experimental para determinação do raio de curvatura de uma lente convergente

Resultados da medida do raio de uma lente convergente (face 1)

a **(cm)**	***b*** **(cm)**	***L*** **(cm)**	***R*** **(cm)**
Raio de curvatura:			

Resultados da medida do raio de uma lente convergente (face 2)

a **(cm)**	***b*** **(cm)**	***L*** **(cm)**	***R*** **(cm)**
Raio de curvatura:			

2. Medida da distância focal de uma lente divergente

Utilizando uma lente divergente, vamos determinar a sua distância focal de forma análoga à utilizada anteriormente. Nesse caso, para pequenos ângulos, o raio de curvatura R de cada uma das faces da lente divergente é dado por (demonstre essa expressão no seu relatório):

$$R = \frac{2a}{b} L \tag{11}$$

Onde a, como mostrado na figura 6, é a distância entre o feixe de referência e o feixe lateral, b é a distância entre o feixe lateral antes e após ser refletido pela lente e L é a distância entre o anteparo e a lente.

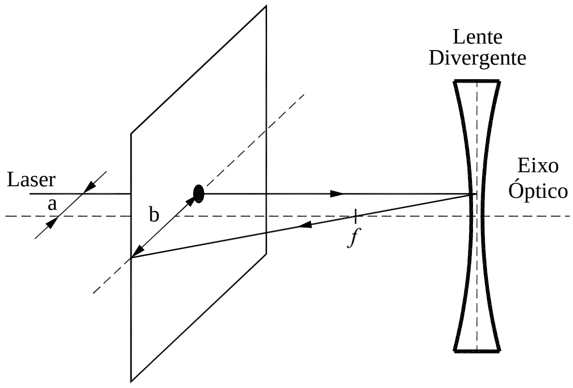

Figura 6 – Montagem experimental para determinação do raio de curvatura de uma lente divergente.

a) Faça 3 medidas distintas de a, b e L para cada uma das faces da lente e utilize a equação 11 para determinar os raios de curvatura das duas faces.

b) Com os resultados do item anterior e o índice de refração do vidro de 1,51, utilize a equação 8 para determinar a distância focal f da lente.

Resultados da medida do raio de uma lente divergente (face 1)

a **(cm)**	***b*** **(cm)**	***L*** **(cm)**	***R*** **(cm)**
Raio de curvatura:			

Resultados da medida do raio de uma lente divergente (face 2)

a **(cm)**	***b*** **(cm)**	***L*** **(cm)**	***R*** **(cm)**
Raio de curvatura:			

3. Determinação da posição de imagens geradas por uma lente convergente

Neste experimento, vamos determinar a posição da imagem gerada pela lente convergente utilizada no item anterior. Para isso, utilizaremos um divisor de feixes (semi-espelho) que, juntamente com o laser, simulará o objeto.

a) Mantendo o alinhamento, volte a usar a lente convergente devidamente alinhada como anteriormente.

b) Utilize um segundo separador de feixe (semi-espelho) para dividir o feixe lateral. Alinhe esse semi-espelho de modo que o feixe após ser refratado pela lente emirja paralelamente ao feixe de referência conforme ilustrado na figura 7. Nesta condição, o feixe refletido pelo segundo semi-espelho deverá interceptar o feixe de referência antes da lente e a uma distância igual a sua distância focal. Verifique essa afirmação. Observação: mantenha o segundo semi-espelho posicionado a uma distância da lente superior à distância focal desta, tal qual ilustrado na figura 7. É conveniente mantê-lo em um suporte com parafuso micrométrico para ajuste da posição lateral do semi-espelho

Conforme ilustrado na figura 7, com essa montagem criamos três raios principais, o primeiro incidindo sob o vértice da lente (feixe de referência), o segundo passando pelo foco da lente (feixe lateral transmitido pelo segundo semi-espelho) e o terceiro emergindo paralelamente ao feixe de referência (feixe lateral transmitido através do segundo semi-espelho). A posição do objeto, *s*, é a distância entre o ponto de intercessão do feixe lateral com o segundo semi-espelho e a lente. O tamanho do objeto, *o*, pode ser interpretado como a distância entre os feixes de referência e lateral. Meça a posição, *s,* e o tamanho deste objeto, *o*.

c) Utilizando a régua transparente encontre a posição em que o feixe lateral transmitido pelo segundo semi-espelho intercepta o feixe lateral refletido pelo mesmo. Neste ponto forma-se a imagem do objeto mencionado no item anterior, sendo a posição da imagem, *s´*, dada pela distância entre o vértice da lente e o ponto de cruzamento dos feixes laterais. Da mesma forma, o tamanho da imagem é definido pela distância entre o ponto de cruzamento dos dois feixes laterais e o feixe de referência. Meça a posição, s´, e o tamanho, o´, desta imagem. Compare os valores medidos com aqueles calculados utilizando as equações 9a e 9b.

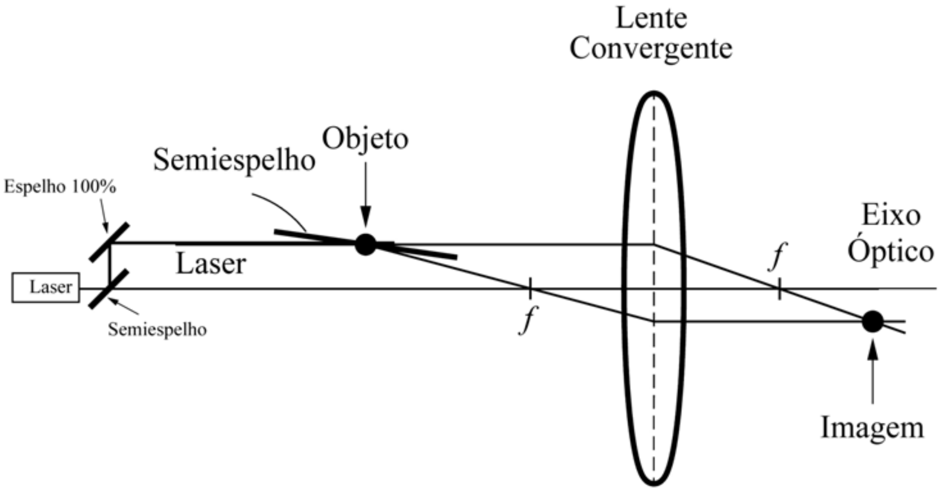

Figura 7 – Montagem experimental para determinação da posição da imagem gerada por uma lente convergente.

Resultados referentes à formação de imagens em lentes

***s* (cm)**	
Tamanho do objeto (cm)	
***s'* (cm) (medido)**	
***s'* (cm) (calculado)**	
***h* (cm) (medido)**	
***h (cm)* (calculado)**	

4. Observação da formação de imagens geradas por lentes convergentes

Nesse experimento vamos observar as imagens extensas formadas por um lente convergente usando uma fonte de luz extensa, isto é, não pontual.

a) Com uma lente convergente corretamente posicionada e alinhada no trilho óptico, direcione o trilho para um objeto distante (uma janela, por exemplo). Coloque um anteparo de papel atrás da lente, alinhado com a mesma. Você deverá observar uma região iluminada no anteparo. Se necessário reajuste a altura e a posição do anteparo para que essa região esteja localizada no seu centro. Varie a posição do anteparo até que a região iluminada seja convertida em uma imagem nítida. Meça s' e verifique se esse valor é consistente com o previsto equação 9.

b) Utilizando uma fenda iluminada por uma lanterna e um anteparo de papel, faça a montagem mostrada na figura 8. Posicione os componentes de modo que a distância s do objeto (fenda iluminada) à lente e da lente ao anteparo s' sejam os mesmos que na montagem do experimento 3. Observe a formação de uma imagem nítida no anteparo e, caso isso não ocorra, mova ligeiramente o anteparo até obter a imagem mais nítida possível.

c) Descreva as características da imagem quanto ao tamanho, natureza e orientação. Calcule a magnificação. Compare este método de projeção ao método com laser (experimento 3), indicando vantagens e desvantagens de cada um.

d) Ainda neste caso, confirme experimentalmente que, se s é maior que f, a imagem real será invertida. Caso contrário (s menor que f), o objeto e sua imagem virtual direta serão formados do mesmo lado da lente (como mostrado na figura 3c). É possível determinar a posição da imagem utilizando este método de projeção? Discuta em seu relatório.

e) Peça ao professor, monitor ou técnico de laboratório para discutir e demonstrar um método para determinação de imagens virtuais sem a utilização do laser, conhecido como método de paralaxe.

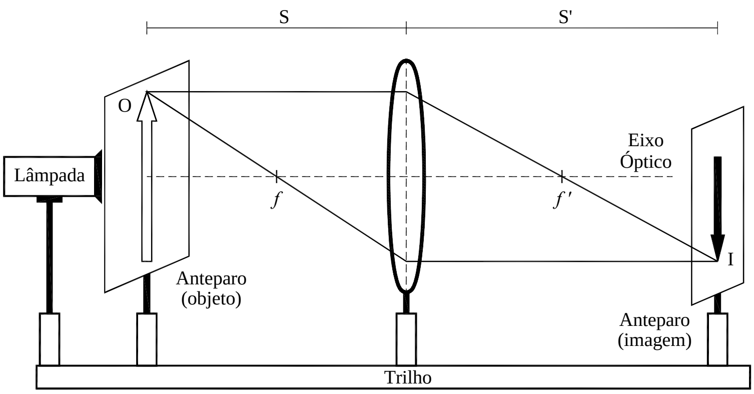

Figura 8 – Montagem experimental para experimentos envolvendo formação de imagens por lentes convergentes.

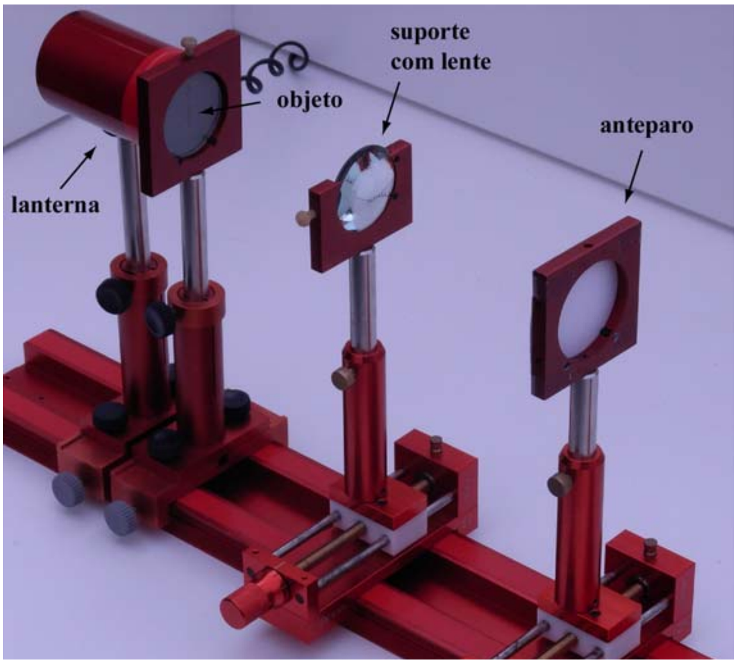

Figura 9 – Fotografia da montagem experimental, mostrando, da esquerda para a direita, a lanterna com a seta, a lente e o anteparo

Distância focal (objeto distante) =

Determinação da posição das imagens geradas por uma lente convergente usando uma lanterna

s **(cm)**	
Tamanho do objeto (cm)	
s' **(cm) (medido)**	
s' **(cm) (calculado)**	
h **(cm) (medido)**	
h (cm) **(calculado)**	