

Reflexão da Luz em Superfícies Curvas: Espelhos

Nesta prática, vamos continuar a explorar a ótica geométrica, estudando os espelhos esféricos, que podem ser côncavos ou convexos.

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. Espelhos côncavos e convexos

Os espelhos esféricos podem ser de dois tipos: côncavos ou convexos. No espelho côncavo, a superfície refletora é a parte interna de uma esfera, enquanto no espelho convexo é a parte externa. Todo espelho esférico é caracterizado pelo raio de curvatura, pelo centro de curvatura e pelo vértice (que é um ponto no próprio espelho). O eixo óptico liga o centro de curvatura ao vértice.

Todo raio de luz que incide no espelho paralelamente ao eixo óptico é refletido, passando por um ponto sobre o eixo óptico, entre o centro de curvatura e o vértice, chamado de foco, desde que a distância entre o raio incidente e o eixo óptico não for muito grande comparada com o raio de curvatura, sendo essa aproximação chamada de *aproximação paraxial*. Fora da aproximação paraxial, os raios paralelos ao eixo óptico não se cruzam todos no mesmo ponto, gerando a aberração esférica, que é tanto pior quanto maior a distância entre o raio e o eixo óptico. Por isso, temos que limitar a abertura do espelho a não mais do que cerca de 10° (essa é a chamada condição de nitidez de Gauss).

II. Distância focal de um espelho esférico

A localização do foco é muito importante para a ótica, mais do que a localização do centro de curvatura. Vamos então deduzi-la para um espelho esférico. A figura 1 mostra dois raios (AB e A'B') paralelos ao eixo óptico. O centro de curvatura é C, o vértice é O, e o foco é o ponto f . Os ângulos ABC e OCB são alternos internos, portanto iguais. O segmento BC é normal ao espelho, portanto decorre das leis de

reflexão que os ângulos ABC e CBF também são iguais. Logo, o triângulo CBF é isóscele, e os segmentos FC e FB têm o mesmo comprimento. Aplicamos então a lei dos cossenos nesse triângulo:

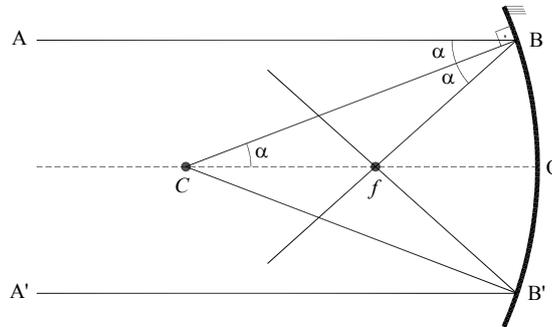


Figura 1 – Dois raios paralelos ao eixo óptico se encontrando no foco de um espelho esférico.

$$2(FC)^2(1 + \cos 2\alpha) = (CB)^2 \quad (1)$$

Vemos claramente dessa expressão que a posição do foco depende de α , que depende da distância do raio ao eixo óptico, o que gera a aberração esférica. Na aproximação paraxial, o ângulo α é pequeno, então fazemos $\cos(2\alpha) \approx 1$ para chegar a:

$$2(FC) = CB \quad (2)$$

Mas CB é simplesmente o raio R de curvatura. A distância focal f é igual a OF (distância entre o espelho e o foco). Logo:

$$f = \frac{R}{2} \quad (3)$$

O foco é o ponto médio entre o centro de curvatura e o vértice.

III. Determinação da imagem formada por um espelho esférico (método geométrico)

Para determinar a posição da imagem formada por um espelho esférico, um método é desenhar alguns raios de luz que saem desse objeto e verificar como esses raios são refletidos e onde eles voltam a se encontrar. Fazer isso com um raio em uma

direção arbitrária não é prático, mas existem alguns raios que são simples de saber como serão refletidos:

- No regime de validade da aproximação paraxial, o raio que incide no espelho descrevendo uma trajetória paralela ao eixo óptico é refletido de forma a passar pelo foco.
- O raio focal, que incide no espelho passando pelo foco, é refletido paralelamente ao eixo óptico. Essa situação é oposta à primeira, e deriva do princípio da reversibilidade dos raios de luz.
- O raio central, que incide no espelho passando pelo centro de curvatura, é refletido sobre si mesmo. Isso ocorre porque qualquer reta passando pelo centro de curvatura é normal ao espelho.
- O raio que incide sobre o vértice do espelho é refletido de forma que o ângulo de reflexão seja igual ao ângulo de incidência, tal como em um espelho plano.

Com essas regras, podemos determinar a imagem de qualquer ponto traçando quaisquer dois desses raios. Algumas vezes, no entanto, os raios em si não se encontram, encontrando-se apenas θ seus prolongamentos na região atrás do espelho. Quando isso ocorre, a imagem é denominada *virtual*; caso contrário, a imagem é denominada *real*.

IV. Determinação da imagem formada por um espelho esférico (método algébrico)

Para se descobrir a posição e a imagem formada por um espelho esférico, também existe também uma maneira algébrica, isto é, através de equações. Vamos inicialmente considerar o caso mostrado na figura 2, de um objeto colocado além do centro de curvatura de um espelho côncavo.

A distância AO do objeto ao espelho será simbolizada por s , a distância A'O da imagem ao espelho por s' , e a distância FO entre o foco e o espelho por f . O tamanho AB do objeto será simbolizado por o , e o da imagem A'B' por o' . No entanto, como a imagem nesse caso é invertida, vamos considerar o' negativo.

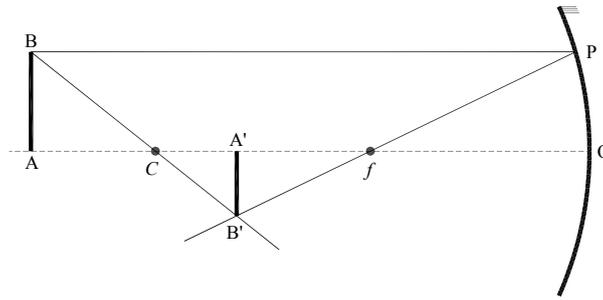


Figura 2 – Objeto AB colocado a frente de um espelho côncavo de vértice O, centro C e foco f , formando a imagem $A'B'$.

Na aproximação paraxial, podemos desprezar a curvatura do espelho e considerar que O e P estão na mesma vertical. Então vemos que há dois pares de triângulos congruentes: $\Delta BPB' \sim \Delta C f B'$ e $\Delta f A' B' \sim \Delta f O P$. Da congruência de cada um, obtemos as seguintes relações:

$$\frac{s}{o - o'} = \frac{f}{-o'} \quad (4a)$$

$$\frac{-o'}{s' - f} = \frac{o}{f} \quad (4b)$$

Essas duas equações podem ser resolvidas para s' em termos de s e f , eliminando o e o' . O resultado é:

$$\frac{1}{s'} = \frac{1}{f} - \frac{1}{s} \quad (5)$$

Essa expressão é normalmente escrita na seguinte forma:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{s} + \frac{1}{s'} \quad (6)$$

Com esse resultado, podemos voltar na equação 4b e calcular o tamanho da imagem:

$$\frac{o'}{o} = -\frac{s'}{s} \quad (7)$$

As equações 6 e 7 permitem calcular a posição e o tamanho da imagem formada. Para utilizá-las, é necessário seguir a seguinte convenção de sinais:

- A distância s de um objeto real ao espelho é sempre positiva.
- A distância s' entre a imagem e o espelho é positiva se a imagem é real (a imagem é formada pelo encontro dos raios de luz) ou negativa se a imagem é virtual (a imagem é formada pelo prolongamento dos raios de luz).
- A distância focal f e o raio de curvatura R são positivos para espelhos côncavos e negativos para espelhos convexos.
- O tamanho o do objeto é sempre positivo.
- O tamanho o' da imagem é positivo se a imagem é direita (isto é, quando fica no mesmo sentido do objeto) ou negativa se a imagem é invertida (isto é, quando fica no sentido oposto ao do objeto).

Podemos sumarizar essa convenção na seguinte tabela:

Tabela 1 – Convenção de sinais para espelhos esféricos.

Parâmetro	Sinal positivo	Sinal negativo
Raio (R) e foco (f)	Espelho côncavo	Espelho convexo
Distância do objeto (s)	Objeto real	–
Distância da imagem (s')	Imagem real	Imagem virtual
Tamanho do objeto (o)	Objeto	–
Tamanho da imagem (o')	Imagem direita	Imagem invertida

V. Tipos de imagens formadas

Agora que sabemos como formar imagens, vamos estudar as imagens que são formadas em alguns casos.

Para espelhos côncavos, há 5 casos a considerar quanto à posição do objeto:

- a) Objeto entre o espelho e o foco ($s < f$). Nesse caso, $s' < 0$ e $o' > o > 0$. A imagem é virtual, direita e ampliada, Fig. 3a.

b) Objeto entre o foco e o centro de curvatura ($f < s < 2f$). Nesse caso, $s' > 0$ e $o' < 0$, com $|o'| > o$. A imagem é real, invertida e ampliada, Fig. 3b..

c) Objeto após o centro de curvatura ($s > 2f$). Nesse caso, $s' > 0$ e $o' < 0$, com $|o'| < o$. A imagem é real, invertida e reduzida, Fig. 3c..

d) Com espelhos convexos, a imagem será sempre virtual, direita e reduzida, Fig. 3d..

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

f) Objeto sobre o centro de curvatura ($s = 2f$). Nesse caso, $s' > 0$ e $o' < 0$, com $|o'| = o$. A imagem é real, invertida e do mesmo tamanho do objeto.

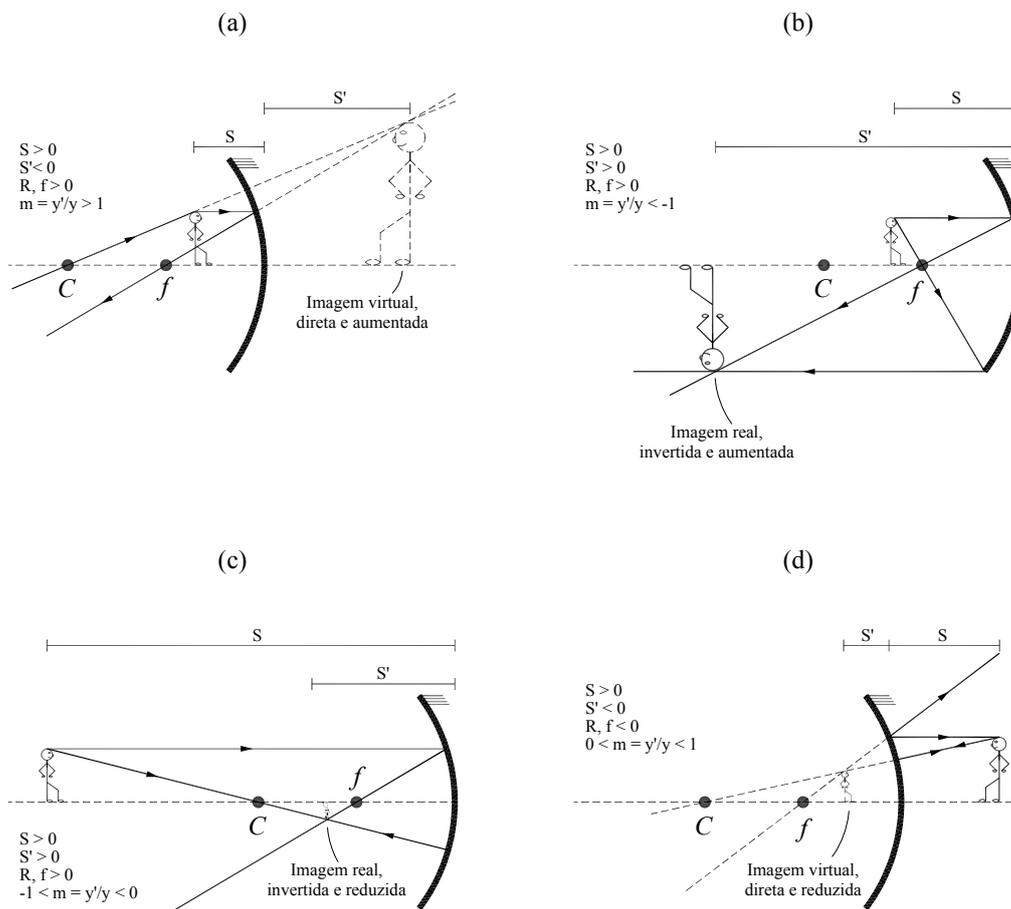


Figura 3 – Imagens formadas por espelhos. (a) Espelho côncavo com objeto localizado entre o foco e o vértice do espelho; (b) Espelho côncavo com objeto localizado entre o centro de curvatura e o foco do espelho; (c) Espelho côncavo com objeto localizado fora do centro de curvatura do espelho; (d) espelho convexo.

Experimentos

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

1. Medida do raio de curvatura e da distância focal de um espelho côncavo

Neste experimento, vamos determinar o raio de curvatura e, por conseguinte, a distância focal de um espelho côncavo.

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 disponíveis em sua bancada (arame metálico fino solidário a um poste de sustentação).

Coloque um pino 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. Coloque um segundo pino de pesquisa em um cavalete e posicione-o entre o laser e o centro de articulação do trilho. Desloque o pino lateralmente até que o feixe de luz laser o intercepte. Mova o pino 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, senão você deverá mover o laser lateralmente ou rotacioná-lo em torno do seu poste de sustentação até que o alinhamento seja conseguido.

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 deverá 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 refletoras. Para obtermos esses dois feixes a partir de uma única fonte de luz laser, utilizaremos o dispositivo mostrado na figura 4. O mesmo é constituído por um semi-espelho (50% de reflexão) que produz dois feixes a 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, como mostrado na figura 4, e posicione-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: Com o auxílio de uma folha de papel confirme que os feixes não se cruzam ou se distanciam para distâncias de alguns metros a partir do semi-espelho.

d) Coloque o espelho côncavo em um suporte óptico que possui 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 do mesmo. Para obter essa situação, você pode mover lateralmente e verticalmente o espelho côncavo.

Utilizando os parafusos micrométricos do suporte, ajuste o espelho de modo que o feixe de referência (feixe transmitido) reflita sobre si mesmo (retro-reflexão). Dica: evite tocar na superfície refletora do espelho diretamente com os dedos, caso o espelho apresente manchas, limpe-o com uma flanela. Caso esteja com dificuldade de determinar qual feixe refletido você está observando, interrompa o feixe vindo do espelho 100% com o dedo (ou algum anteparo), assim a única reflexão observada será do feixe transmitido.

e) Em sua bancada existe um suporte onde se encontra fixa uma pequena régua transparente. Coloque-o em um cavalete e posicione-o entre o divisor de feixe e o espelho, como 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 espelho é a distância focal.

Resultados da medida da distância focal de um espelho côncavo

Distância focal	Raio de curvatura

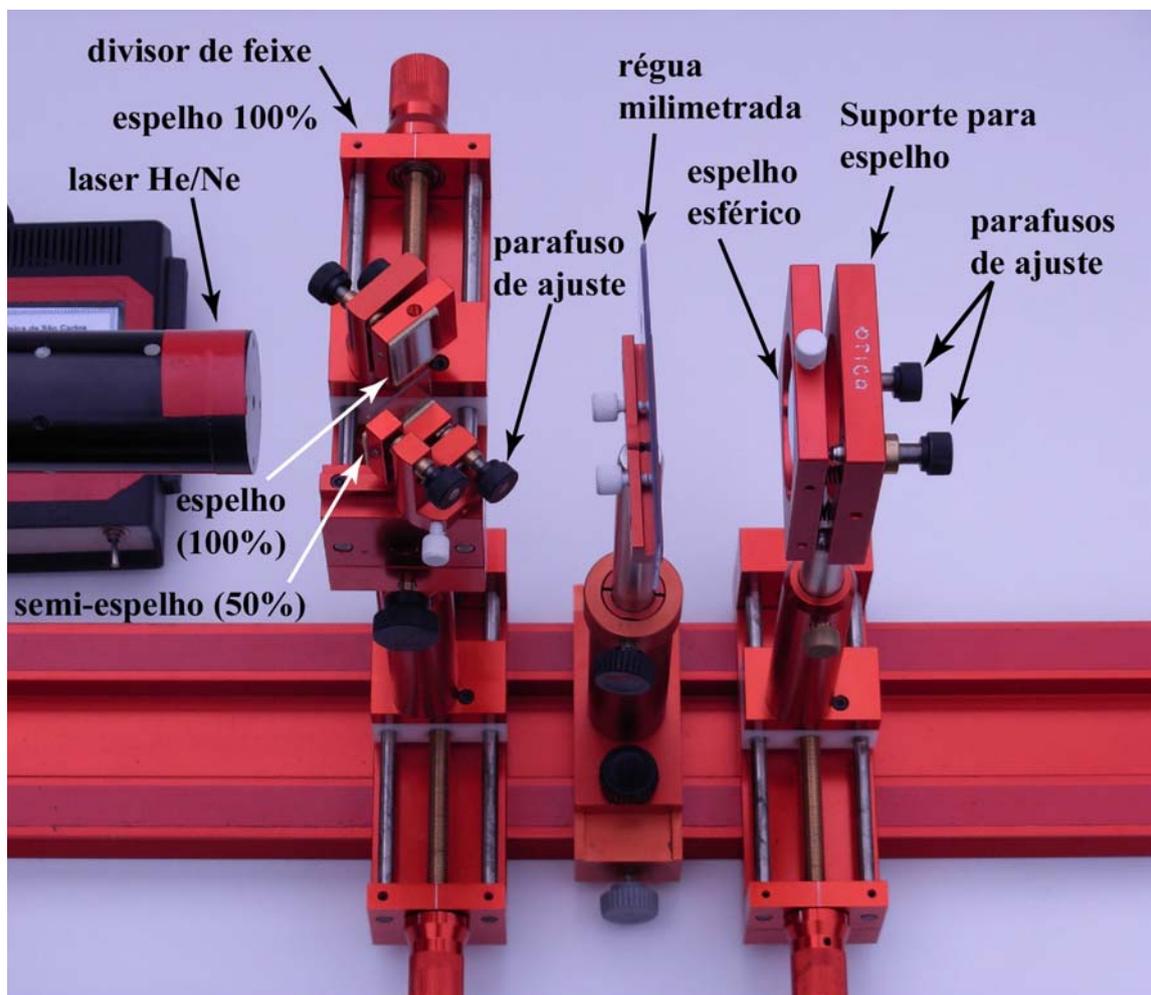


Figura 4 – Montagem do experimento para determinação do raio de curvatura de um espelho esférico. Da esquerda para a direita: laser, divisor de feixe, régua milimetrada e suporte com espelho.

2. Medida do raio de curvatura e da distância focal de um espelho convexo

a) Mantendo o sistema alinhado, remova cuidadosamente o espelho esférico e reposicione-o no suporte de modo que o lado convexo fique voltado para o laser. Usando o mesmo procedimento anterior, alinhe o espelho convexo de modo que o feixe de referência incida no centro do espelho e seja retro-refletido. Note que, agora o feixe lateral não interceptará o feixe de referência.

b) Posicione a régua transparente a uma distância L do espelho de modo a observar reflexão do feixe lateral sobre a mesma, ver figura 5 e fotografia na figura 4. Meça as distâncias a , b , e L mostradas na figura 5 e determine o raio de curvatura do espelho utilizando a equação 8 (demonstre essa equação). Realize três medidas distintas e estime um desvio padrão para as medidas. Dica: minimize seus erros usando maiores valores de b (explique por que). Para isso, ajuste os valores de L usados.

$$R = \frac{2a}{b} L \quad (8)$$

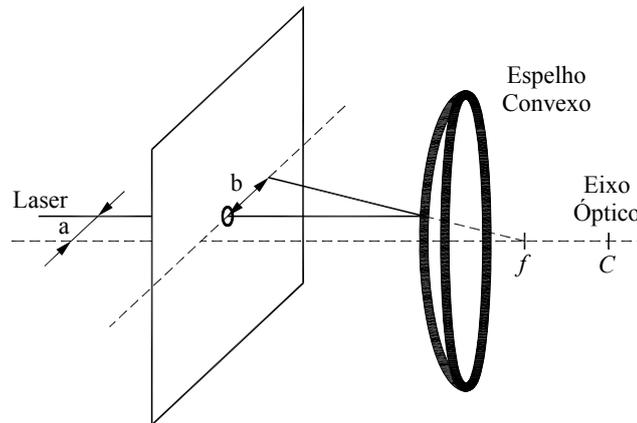


Figura 5 – Montagem para determinar o raio de curvatura de um espelho convexo

Resultados da medida da distância focal de um espelho convexo

a (cm)	b (cm)	L (cm)	R (cm)
Distância focal:			

3. Determinação da posição das imagens geradas por um espelho côncavo

Nesse experimento vamos determinar a posição das imagens formadas pelo espelho côncavo já caracterizado.

a) Mantendo o alinhamento anterior volte a usar a face côncava do espelho. Alinhe o espelho esférico como realizado anteriormente.

b) Utilize um segundo separador de feixe (semi-espelho) para dividir o feixe lateral. Alinhe esse semi-espelho de modo que o feixe refletido por ele passe pelo foco

do espelho côncavo (cruzamento entre o feixe lateral e o feixe de referência). Isto pode ser ajustado utilizando a régua transparente.

Note que, conforme ilustrado na figura 6, com essa montagem criamos três raios principais, o primeiro incidindo sob o vértice do espelho (feixe de referência), o segundo passando pelo foco do espelho (feixe lateral refletido pelo segundo semi-espelho) e o terceiro incidindo 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 o espelho. 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 do espelho e o ponto de cruzamento dos feixes laterais.

Analogamente ao caso anterior, 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 6 e 7.

d) Repita o experimento para duas situações distintas:

Situação 1: Objeto localizado além do centro de curvatura do espelho;

Situação 2: Objeto localizado entre o centro de curvatura e o foco do espelho;

e) Explique, em seu relatório, por que esse método não se aplica aos casos de imagens virtuais.

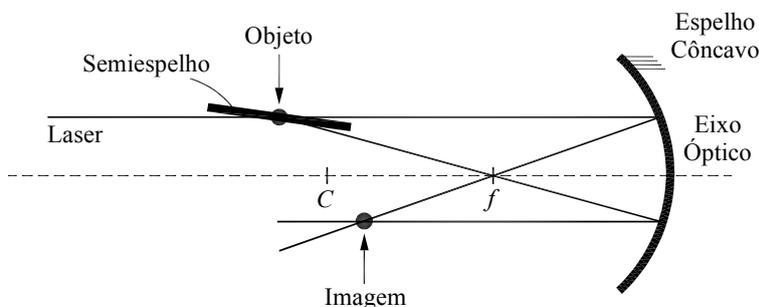


Figura 6 – Montagem experimental para determinação da posição da imagem gerada por um espelho côncavo.

Determinação da posição das imagens geradas por um espelho côncavo utilizando um laser

	Situação 1	Situação 2
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 um espelho côncavo

Nesse experimento vamos observar as imagens extensas formadas por um espelho côncavo usando luz branca.

a) Com um espelho posicionado no trilho óptico, direcione o trilho para um objeto distante (uma janela, por exemplo). Coloque um anteparo (um pequeno cartão branco pode ser usado) entre o objeto e o espelho, de modo que sua extremidade superior esteja aproximadamente alinhada com o eixo do espelho. Você deverá observar uma região iluminada no anteparo. Se necessário reajuste a altura e a posição do anteparo para que a região esteja localizada no seu centro. Varie a posição do anteparo ao longo do eixo do trilho óptico, até que esta região iluminada seja convertida em uma imagem nítida. Meça s' e verifique se esse valor é consistente com o previsto equação 6.

b) Faça a montagem indicada na figura 7 e 8. Coloque um objeto (fenda iluminada em forma de seta) perpendicularmente e próximo ao eixo óptico de um espelho. Mova o espelho até que sua imagem nítida seja formada no plano do objeto, i.e., até que a posição da imagem coincida com a do objeto. Nestas condições, será encontrado o centro de curvatura do espelho (justifique essa afirmação). Esse valor é compatível com o valor determinado anteriormente para a distância focal?

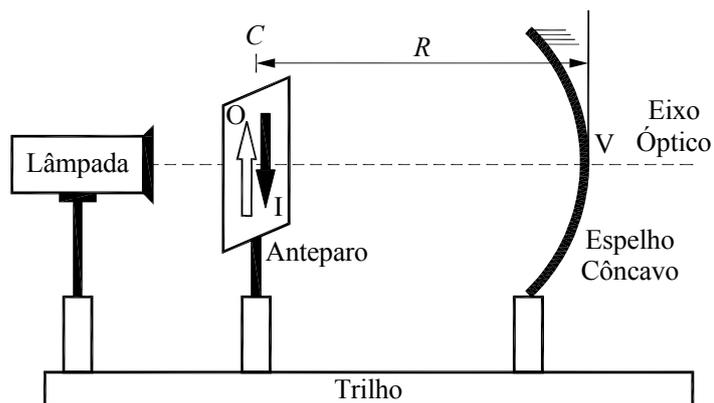


Figura 7 – Montagem experimental para determinação do centro de curvatura de um espelho côncavo utilizando uma lanterna.

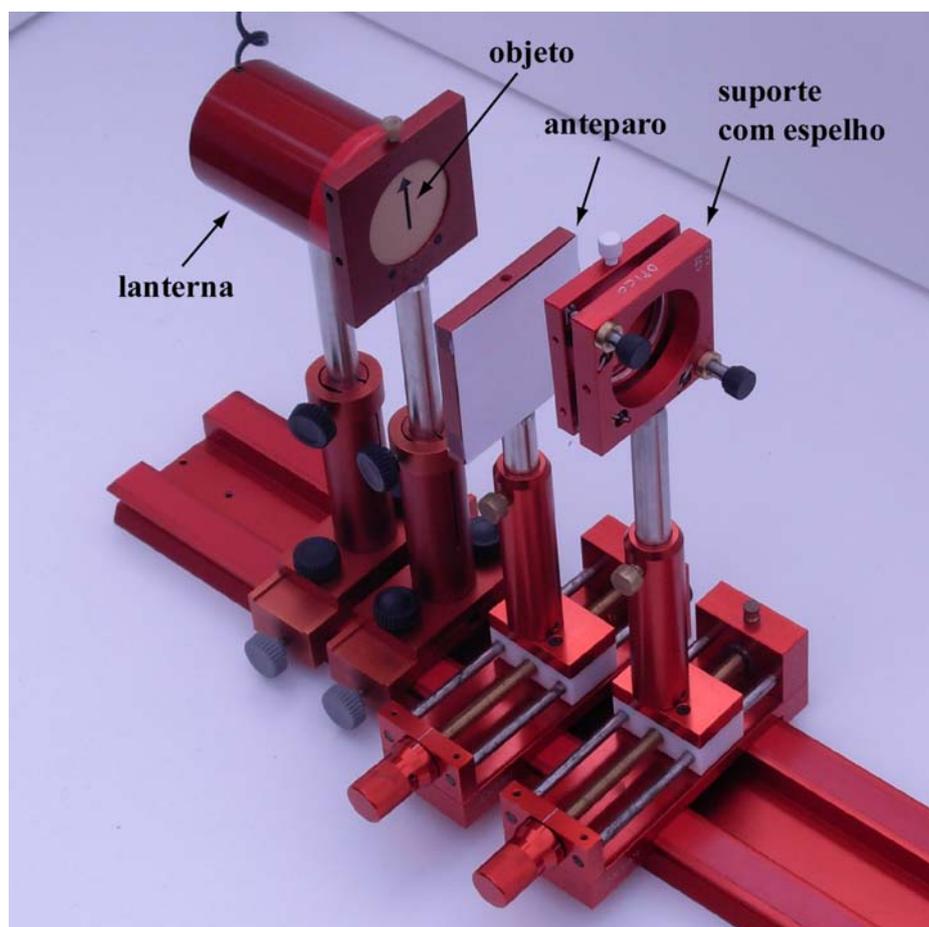


Figura 8 – Fotografia da montagem experimental para observação de imagens formadas por um espelho côncavo utilizando uma lanterna.

c) Monte o aparato experimental mostrado na figura 9a da seguinte maneira: posicione um espelho côncavo no trilho óptico em frente da fenda iluminada (objeto) de modo que a distância s entre a fenda e o espelho seja a mesma que na montagem do experimento 3. Cuide para que o eixo óptico do espelho esteja perpendicular à fenda e passando aproximadamente pelo seu centro.

d) Coloque um pequeno anteparo em um suporte e posicione na mesma posição s' determinada para a imagem na montagem do experimento 3. A borda superior do cartão deverá ficar logo abaixo do objeto. Você deverá observar uma imagem nítida se formar no cartão. Movendo ligeiramente o cartão ao longo do trilho verifique se a focalização da imagem é melhorada.

e) Com a distância focal determinada nos itens anteriores e os valores de s e s' medidos nessa situação, verifique a validade da equação 6 e compare este método com a montagem da figura 6. Determine o aumento da imagem e compare com o valor esperado teoricamente.

f) Mova o espelho (ou o objeto) de modo que o objeto esteja posicionado entre o seu centro de curvatura e o foco. Neste caso, faça com que a borda inferior do espelho esteja alinhada com o eixo óptico (como na figura 9b). Utilizando a equação 6 determine a posição da imagem e posicione o anteparo na posição encontrada. **Dica:** Para facilitar a visualização da imagem incline levemente o espelho de modo que ela seja formada na parte superior da lâmpada. Discuta as características da imagem (natureza, tamanho e orientação) de acordo com o previsto pela teoria.

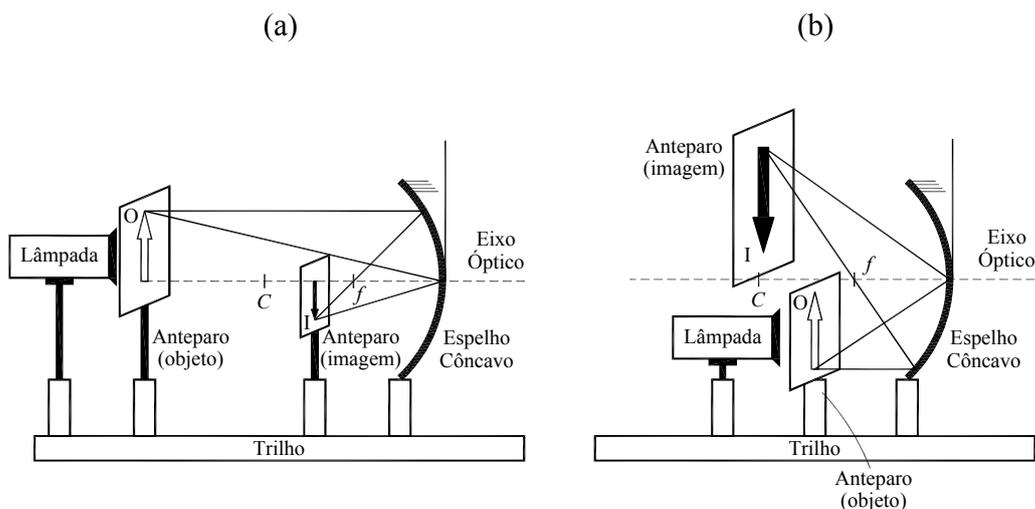


Figura 9 – Montagens experimentais para experimentos com imagens reais formadas por espelhos côncavos utilizando uma lanterna.

Resultados da medida da distância focal de um espelho côncavo

Distância focal (objeto distante)	Raio de curvatura (determinação direta)

Determinação da posição das imagens geradas por um espelho côncavo usando uma lanterna

	Situação 1	Situação 2
s (cm)		
Tamanho do objeto (cm)		
s' (cm) (medido)		
s' (cm) (calculado)		
h (cm) (medido)		
h (cm) (calculado)		