

Exp. 9

Espelhos e Lentes

FSC5144 - Laboratório de Física IV
FSC5123 - Física experimental II

lemo.ufsc.br
Versão de 12 de agosto de 2019

1 Objetivos

São disponibilizados neste experimento alguns elementos óticos, dentre os quais espelhos e lentes. O objetivo é medir a distância focal de

- um espelho côncavo pelo método da ampliação;
- lentes convergentes pelos métodos gráfico e de Bessel;
- uma lente divergente pelo método do acoplamento.

2 Teoria Básica

Em diversas situações, é conveniente estudar as propagações luminosas em termos de **raios de luz**. Os raios são representados por linhas retas orientadas na direção em que a luz se propaga. Os fenômenos que são satisfatoriamente explicados usando este artifício constituem o terreno da chamada **Ótica Geométrica**.

O fenômeno principal a ser observado e estudado nesta experiência é o da **formação de imagens**. Para formar a imagem de um objeto, é preciso iluminá-lo, caso ele não tenha luz própria. É preciso ainda utilizar um ou mais elementos óticos para desviar os raios luminosos que emergem do objeto e formar a imagem.

Os fenômenos subjacentes à formação de imagem e que permitem o desvio de feixes luminosos são a **reflexão** e a **refração**.

Nesta experiência, os elementos óticos utilizados serão **espelhos e lentes esféricos**. O espelho tem superfície metálica refletora e a lente é feita de material transparente à luz e através do qual ela refrata, sem tratamento refletor na superfície.

2.1 Espelhos

Um espelho esférico é aquele cuja superfície refletora é esférica. Pode ser classificado como **côncavo** (face espelhada voltada para o centro de curvatura) ou **convexo** (face espelhada oposta ao centro de curvatura), como ilustra a figura 1.

O centro de curvatura é o centro da esfera que define a superfície do espelho e o **raio de curvatura** R é o raio desta esfera. A linha que une o vértice V e o centro de curvatura é denominada eixo principal.

Um feixe de raios paralelos ao eixo principal reflete-se obedecendo naturalmente à lei da reflexão. Num espelho côncavo, os raios paralelos próximos ao eixo principal convergem todos para um único ponto, denominado foco; num espelho convexo, o feixe refletido divergirá como se viesse de um ponto localizado atrás do espelho, como na figura 1. A distância do foco F ao vértice V é chamada **distância focal** do espelho, sendo representada por f .

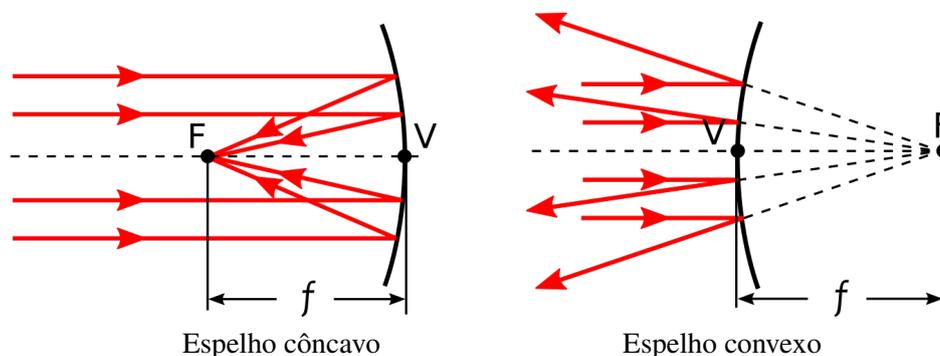


Figura 1 Distância focal em espelhos esféricos

A distância focal de um espelho esférico é determinada pelo seu raio de curvatura:

$$f = \frac{R}{2}, \quad (1)$$

onde, para efeito cálculo de formação de imagem, como veremos adiante, convencionase que $R > 0$ ($f > 0$) para espelhos côncavos e $R < 0$ ($f < 0$) para espelhos convexos.

2.2 Lentes

Uma lente é um dispositivo ótico capaz de focalizar ou dispersar a luz por meio da refração. As lentes simples consistem em uma única peça de material transparente, com duas faces. As lentes mais comuns são aquelas cujas faces curvas são esféricas. Uma lente pode ser dita esférica mesmo que tenha uma face plana e outra esférica.

Pode-se classificar as lentes em dois grandes grupos: o das lentes **convergentes** e o das **divergentes**. As lentes convergentes, capazes de focalizar a luz, são mais espessas na parte central do que nas bordas, ao passo que as divergentes, que dispersam a luz, são mais espessas nas bordas (ver figura 2).

Cada face esférica de uma da lente tem um centro de curvatura C e um raio de curvatura R . A linha que une os dois centros de curvatura denomina-se eixo principal, que é basicamente o eixo pontilhado perpendicular à lente apresentado na figura 2.

Um feixe de raios paralelos ao eixo principal, incidindo numa lente convergente, refrata-se, convergindo para um ponto F denominado foco. A distância do centro geométrico da lente ao foco é a distância focal f da lente. Se o feixe incidir numa lente divergente, o feixe refrata divergindo, como se tivesse saído de um único ponto F , denominado foco virtual (ver novamente figura 2).

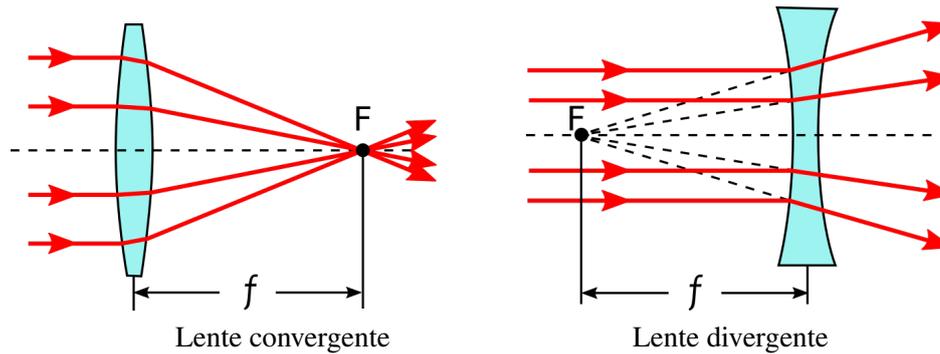


Figura 2 Distância focal em lentes delgadas

Se, como vimos, o que determina a distância focal de um espelho esférico é simplesmente seu raio de curvatura, o caso das lentes é um pouco mais complexo. Além dos raios de curvatura R_1 e R_2 de suas duas faces, é necessário levar em conta os índices de refração¹ do material da lente (n_1) e do meio que a circunda (n_2), que é geralmente o ar. A expressão que determina f em função desses parâmetros é conhecida como *equação dos fabricantes de lentes*:

$$\frac{1}{f} = (n - 1) \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right), \quad (2)$$

onde $n = n_1/n_2$. Caso uma das faces da lente seja plana, entende-se que seu raio de curvatura é infinito, de modo que $1/R = 0$.

Utiliza-se a seguinte convenção de sinais: $R > 0$ quando a superfície em questão for convexa; $R < 0$ quando a superfície em questão for côncava.

2.3 Formação de imagens

De maneira geral, diz-se que uma imagem de um determinado objeto é formada quando os raios emergentes de um mesmo ponto do objeto:

1. se cruzam num único ponto após serem desviados por um elemento ótico, situação em que dizemos que se formou uma **imagem real**; OU
2. são dispersados pelo elemento ótico, mas seus prolongamentos se cruzam num único ponto, situação em que dizemos que se formou uma **imagem virtual**.

As **grandezas relevantes** na formação de imagens são:

- f : distância focal do elemento ótico;
- p : distância entre o objeto e o elemento ótico;
- p' : distância entre a imagem e o elemento ótico;
- o : tamanho do objeto;
- i : tamanho da imagem;
- $M \equiv i/o$: fator de ampliação da imagem com relação ao objeto.

¹ Veja a teoria da Experiência 11 (Medidas de Índices de Refração) para mais informações sobre o conceito de índice de refração.

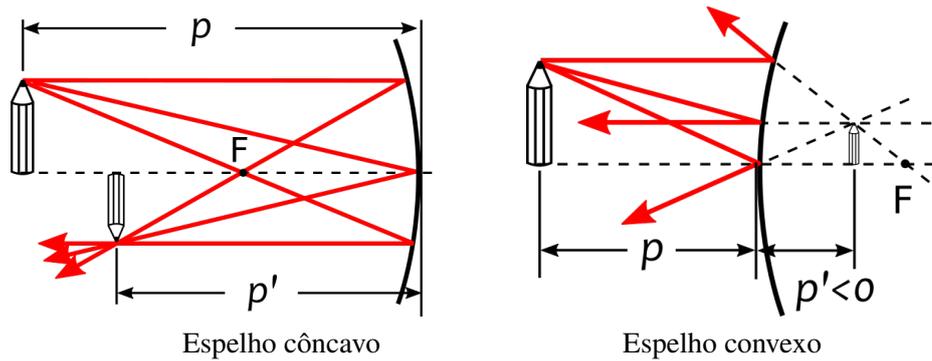


Figura 3 Formação de imagem real com um espelho côncavo e de imagem virtual com um espelho convexo.

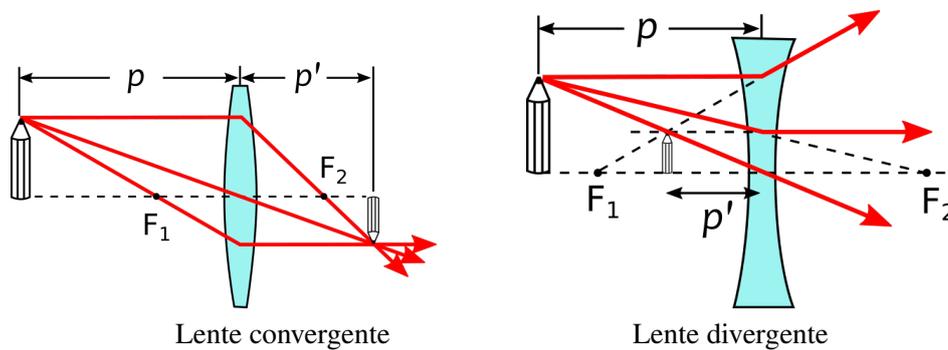


Figura 4 Formação de imagem real com uma lente convergente e de imagem virtual com uma lente divergente.

As figuras 3 e 4 ilustram a formação de imagens reais e virtuais tanto com espelhos curvos quanto com lentes. O objeto é representado pela figura de um lápis. Nestas figuras, é possível entender o caminho dos raios aplicando as regras de deflexão dos raios principais, descritas no quadro abaixo.

Conhecendo-se o tamanho o e a distância p de um objeto em relação a um elemento óptico, pode-se determinar graficamente o tamanho i e a distância p' da imagem. Basta conhecer o comportamento dos três **raios principais** que emergem do objeto:

1. o raio paralelo ao eixo principal, que é defletido na direção que passa pelo foco;
2. o raio emitido na direção do foco, que é defletido paralelamente ao eixo principal;
3. para a lente: o raio que passa pelo centro geométrico da lente não é defletido;
para o espelho: o raio que passa pelo centro de curvatura do espelho é refletido sobre si mesmo.

A seguir apresenta-se um conjunto de equações que se aplicam a espelhos esféricos de pequena abertura e a lentes delgadas.

Equação dos pontos conjugados:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{p} + \frac{1}{p'} \quad (3)$$

Equação da ampliação:

$$M = \frac{i}{o} = -\frac{p'}{p} \quad (4)$$

A utilização das equações acima segue a seguinte **convenção de sinais**:

Supondo $p > 0$ e $o > 0$,

- $p' > 0$ para imagens reais;
- $p' < 0$ para imagens virtuais;
- $f > 0$ para espelhos côncavos e lentes convergentes;
- $f < 0$ para espelhos convexos e lentes divergentes;
- $i > 0$ para imagens direitas (orientadas no mesmo sentido que o objeto);
- $i < 0$ para imagens invertidas.

Por fim, a tabela 1 resume e completa o exposto. Examine-a cuidadosamente para se familiarizar com as medidas que serão feitas no laboratório.

$f > 0$
objeto: $p > f \Rightarrow$ imagem: $p' > 0$ e $M < 0$ (real e invertida)
objeto: $p < f \Rightarrow$ imagem: $p' < 0$ e $M > 0$ (virtual e direita)
$f < 0$
objeto: qualquer $p \Rightarrow$ imagem: $p' < 0$ e $M > 0$ (virtual e direita)

Tabela 1 Convenção de sinais para f , p' , M e R aplicada na formação de imagens com espelhos e lentes

3 Métodos de medida de distância focal

3.1 Espelho côncavo: método da ampliação

Nesta experiência, mede-se a distância focal f de um espelho côncavo pelo método da ampliação, devido à dificuldade de medir a distância p' (entre o espelho e a imagem). Isolando p' da equação (4) e substituindo na equação (3) resulta:

$$f = \frac{M \cdot p}{M - 1} \quad (5)$$

3.2 Lente convergente: método gráfico

Para determinar a distância focal de uma lente convergente, mede-se p e p' para diversas posições da lente. Construindo um gráfico de $1/p$ em função de $1/p'$ a partir da coleção de pontos, espera-se obter uma reta (figura 5).

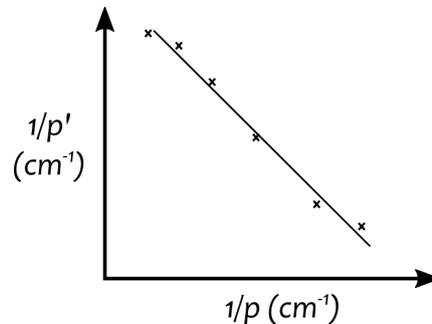


Figura 5 Método gráfico

A equação da reta que melhor se ajusta aos pontos experimentais deve ser comparada à equação (3), como explicado a seguir.

A equação de reta $y = A + Bx$, com $y = 1/p'$ e $x = 1/p$, toma a seguinte forma:

$$\frac{1}{p'} = A + B \frac{1}{p} \quad (6)$$

Quando a equação acima é comparada com a equação (3), que pode ser reescrita

$$\frac{1}{p'} = \frac{1}{f} - \frac{1}{p}, \quad (7)$$

vemos que

$$\text{coeficiente linear : } A = 1/f \quad (8)$$

$$\text{coeficiente angular : } B = -1 \quad (9)$$

O coeficiente linear deste gráfico permite obter f da lente em questão.

3.3 Lente convergente: método de Bessel

Outro método para determinar f de uma lente convergente, é o método do deslocamento ou método de Bessel (figura 6). Inicialmente arbitra-se uma distância D entre o objeto e o anteparo onde vai se formar a imagem deste objeto. Coloca-se a lente convergente entre o objeto e o anteparo, procurando obter uma imagem nítida do objeto sobre o anteparo. Continuando a deslocar esta lente, haverá uma segunda posição em que a lente produz outra imagem, de tamanho diferente da anterior. A distância entre estas duas posições da lente denomina-se d .

Pela figura 6 observa-se que:

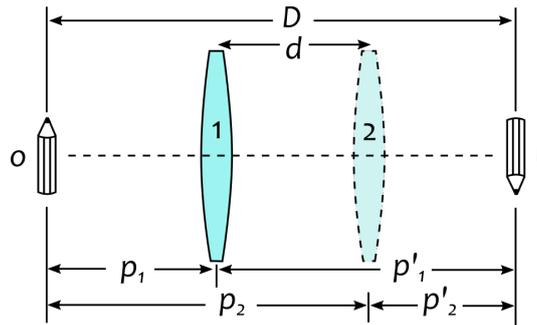


Figura 6 Método de Bessel: existem até dois pontos (1 e 2) onde se pode posicionar a lente de distância focal f para que se forme a imagem no anteparo fixo a uma distância D do objeto.

$$D = p_1 + p'_1 = p_2 + p'_2 \quad (10)$$

$$d = p_2 - p_1 = p'_1 - p'_2, \quad (11)$$

donde é possível mostrar que

$$d = \sqrt{D(D - 4f)} \Rightarrow f = \frac{D^2 - d^2}{4D}. \quad (12)$$

3.4 Lente divergente: método do acoplamento

Duas lentes delgadas, de distâncias focais f_1 e f_2 , podem ser colocadas em contato, uma em sequência da outra, ou seja, acopladas. Essa combinação de lentes é equivalente a uma lente de distância focal f dada por

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2}. \quad (13)$$

Para determinar a distância focal f_1 de uma lente divergente, utiliza-se uma outra lente convergente, de distância focal f_2 conhecida, acoplada à primeira. Medindo-se a distância focal f do sistema de lentes acopladas, determina-se, com a ajuda da equação acima, o valor de f_1 .

4 Referências Bibliográficas

- Halliday, Resnick & Walker, *Fundamentos de Física*, Vol. 4, Ed. LTC
- Moysés Nussenzveig, *Curso de Física Básica*, Vol. 4, Ed. Blucher
- Piacentini, Grandi, Hofmann, de Lima & Zimmerman, *Introdução ao Laboratório de Física*, Ed. da UFSC.
- Helene & Vanin, *Tratamento estatístico de dados em física experimental*, Ed. Blucher

5 Relação do material

- 01 fonte luminosa.
- 01 trilho de ferro fundido com escala milimetrada e $L = 150$ cm.
- 01 placa metálica laqueada de branco.
- 04 suportes metálicos para trilho tipo “V”.
- 01 lâmina 8 x 8 cm com entalhe de “F” (objeto).
- 01 espelho côncavo A com $f = 250$ mm.
- 01 lente convergente B com $f = 20$ cm (ou B' com $f = 15$ cm).
- 01 lente convergente C com $f = 15$ cm (ou C' com $f = 20$ cm).
- 01 sistema de lentes, designado D, composto por uma lente convergente $f = 5$ cm e uma lente divergente $f = -10$ cm atarraxada (ou D', com 10 cm e -20 cm).
- 03 suportes metálicos de lentes.

6 Esquema de montagem

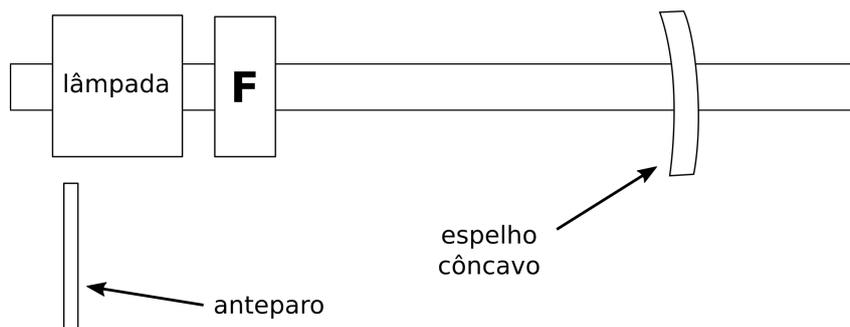


Figura 7 Esquema de montagem usando espelho côncavo (vista superior)

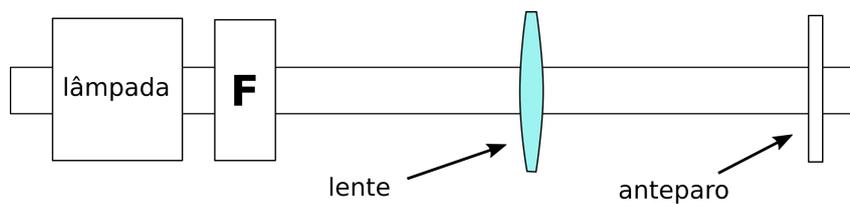


Figura 8 Esquema de montagem usando lente (vista superior)

7 Procedimento experimental

ATENÇÃO: NÃO ENCOSTE DIRETAMENTE NAS SUPERFÍCIES DAS LENTES E DOS ESPELHOS, TAMPOUCO TENHA TENTADO LIMPÁ-LAS!

PRIMEIRA PARTE - Espelho côncavo, método da ampliação

1. Ligue a lâmpada e verifique se o feixe luminoso está paralelo ao trilho.
2. Coloque o espelho côncavo A sobre o trilho, conforme o esquema da figura 7. Desloque o espelho sobre o trilho, até obter a imagem do objeto (letra F) sobre o anteparo posicionado ao lado do trilho a uma distância arbitrária da lente.
3. Meça p , i e o . Não é necessário medir p' . Anote na Tabela I da folha de dados. Utilize a equação (5) para calcular f . Preste atenção ao sinal de M , que dependerá do sinal atribuído a i .
4. Repita o procedimento acima mais duas vezes para completar a tabela, agora com diferentes valores de p . Dica: é mais fácil arbitrar a posição do anteparo e tentar focalizar a imagem sobre ele movendo o espelho para uma nova posição.

SEGUNDA PARTE - Lente convergente, método gráfico

1. Substitua o espelho pela lente convergente B. Na outra extremidade do trilho, coloque o anteparo (figura 8).
2. Desloque a lente até obter uma imagem nítida projetada no anteparo. Meça p e p' e anote na Tabela II.
3. Aproxime um pouco o anteparo no sentido da lente. Ajuste a posição da lente de modo a focalizar novamente o objeto. Meça novamente p e p' , repetindo o processo até completar a tabela.

TERCEIRA PARTE - Lente convergente, método de Bessel

1. Ponha a lente C entre o objeto e o anteparo, que devem ser posicionados no máximo afastamento entre si. Desloque a lente sobre o trilho até obter uma imagem nítida no anteparo. Se continuar a deslocar a lente em direção ao anteparo haverá uma segunda posição em que ocorrerá formação de imagem.
2. Meça D e d (verifique na figura 6) e anote estes valores na Tabela III. Calcule a distância focal f com a equação (12).
3. Aproxime um pouco o anteparo no sentido do objeto. Isto significa estabelecer um novo valor de D . Forme a imagem novamente para duas posições e meça d .
4. Repita o item anterior até obter um total de quatro medidas e quatro valores de f , sendo que a última medida deverá ser para $d = 0$.

QUARTA PARTE - Lente divergente, método do acoplamento

1. Substitua a lente anterior pelo sistema de lentes D, constituído por uma lente convergente de distância focal conhecida e uma lente divergente atarraxada sobre ela, de distância focal a ser obtida.
2. Desloque o sistema sobre o trilho até obter uma imagem sobre o anteparo. Meça p e p' e anote na tabela IV.

3. Gire o sistema de lentes acopladas aplicando-lhe uma rotação de 180° em torno do eixo vertical, de maneira a inverter a ordem na qual a luz atravessa as duas lentes. Nesta nova configuração, refaça as medidas de p e p' . Esta é uma maneira de compensar o erro cometido quando se supõe que as medidas de p e p' são feitas em relação ao centro geométrico do sistema. Use a equação dos pontos conjugados para calcular f nas duas situações. A distância focal correta será a média aritmética dos dois valores obtidos.
4. Utilizando este último valor de f e a distância focal da lente convergente fornecida pelo fabricante, calcule a distância focal da lente divergente com a equação (13). Anote o resultado na Tabela IV.

8 Questionário

1. (a) Calcule o valor médio da distância focal do espelho côncavo com os dados da Tabela I. Calcule o erro percentual em relação ao valor nominal, anotado no espelho.
(b) Explique como variam o tamanho (i) e a posição (p') da imagem à medida que o espelho côncavo se afasta do objeto (veja Tabela I).
2. (a) Faça o gráfico de $1/p'$ em função de $1/p$ com os dados da Tabela II.
(b) Calcule os coeficientes angular e linear pelo método da regressão linear e, a partir deles, ache f .
(c) Calcule o erro percentual de f em relação ao valor nominal.
3. (a) Calcule o valor médio da distância focal da lente com os dados da Tabela III. Calcule o erro percentual em relação ao valor nominal, anotado na lente.
(b) Ao fazer as medidas da Tabela III, você deve ter percebido que a distância D possui um valor mínimo (obtido quando $d = 0$) abaixo do qual não se pode formar uma imagem nítida no anteparo. De acordo com a equação (12), qual deve ser este valor mínimo para uma dada distância focal f ?
(c) Compare percentualmente os valores mínimos teórico e experimental de D . O teórico é aquele previsto pela equação (12), usando o valor nominal de f . O experimental é o valor de D medido quando $d = 0$.
4. (a) O que ocorre com a distância focal de uma lente convergente de vidro quando ela é mergulhada em água? Permanece igual, aumenta ou diminui? Justifique qualitativamente.
(b) Mostre que $f_{\text{água}} \simeq 3,9f_{\text{ar}}$. Dados (índices de refração do vidro e da água): $n_{\text{vidro}} = 1,50$ e $n_{\text{água}} = 1,33$.
5. (a) Explique a necessidade de se acoplar uma lente convergente à lente divergente para determinar a distância focal da última, tendo em vista o aparato experimental disponível.
(b) Calcule o erro percentual do valor medido de f_{DIV} com relação ao valor nominal.

Exp. 9 - Espelhos e Lentes

GRUPO: _____

ALUNOS: _____

TURMA: _____

DATA: _____

► Primeira Parte - Método da ampliação p/ espelho côncavo

TABELA I - Espelho "A"

Valor nominal: $f_N =$ _____ cm

Posição anteparo	p (cm)	i (cm)	o (cm)	$M = i / o$	f (cm)
1					
2					
3					

► Segunda Parte - Método gráfico p/ lente convergente

TABELA II - Lente "B"

Valor nominal: $f_N =$ _____ cm

Posição anteparo	p (cm)	p' (cm)	$1/p$ (cm)	$1/p'$ (cm)
1				
2				
3				
4				
5				

► Terceira Parte - Método de Bessel p/ lente convergente

TABELA III - Lente "C"

Valor nominal: $f_N =$ _____ cm

Posição anteparo	D (cm)	d (cm)	f (cm)
1			
2			
3			
4		0	

► Quarta Parte - Método do acoplamento p/ lente divergente

TABELA IV - Sistema de lentes "D"

Valores nominais: $f_{CONV} =$ _____ cm, $f_{DIV} =$ _____ cm

	p (cm)	p' (cm)	f (cm)	Valor médio: $f_m =$ _____ cm
Primeira medida				Valor experimentalmente obtido para $f_{DIV} =$ _____ cm
Medida após rotação				