Apostila

Física Experimental II

Divinópolis

Fábio Lacerda Resende e Silva

Dalson Eloy Almeida

Rafael Marcelino do Carmo Silva

CEFET-MG

Sumário

1 Movimento Harmônico Simples

1.1 Objetivo

Verificar, através de análise gráfica, a relação entre a constante elástica de uma mola e seu período de oscilação em um sistema massa mola. Analisar a influência da massa da mola nessa relação. Verificar a relação entre o período de oscilação de um pêndulo simples e seu comprimento e estimar a aceleração da gravidade local.

1.2 Fundamento Teórico

Um movimento que se repete é chamado de movimento harmônico ou periódico. Quando um corpo realiza um movimento harmônico, ele possui sempre uma posição de equilíbrio estável. Quando é deslocado dessa posição e solto, surge uma força restauradora que o faz retornar à sua posição de equilíbrio. Ele atinge a posição de equilíbrio com energia cinética máxima, dessa maneira, ultrapassa essa posição, o que faz com que esse movimento de "vai e volta" se repita. Na ausência de forças dissipativas, esse movimento ocorre infinitamente [1].

Em um sistema massa mola ideal, mola com massa desprezível, o período de oscilação T do sistema é dado por:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}, \tag{1.1}$$

onde m é a massa da partícula presa a mola à mola e k sua constante elástica.

Considerando um sistema massa mola onde a mola é não ideal, possuindo uma massa m_s, conforme ilustra a Figura 1.1, é possível mostrar que o período de oscilação desse sistema é dado por [2]:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m + f m_s}{k}}, \tag{1.2}$$

onde o produto fm_s é chamado de massa efetiva da mola e k sua constante elástica. Segundo Rodriguez e Gesnouin [2] e Galloni e Kohen [3], o valor de f está entre $1/3$ ou $4/\pi^2$.

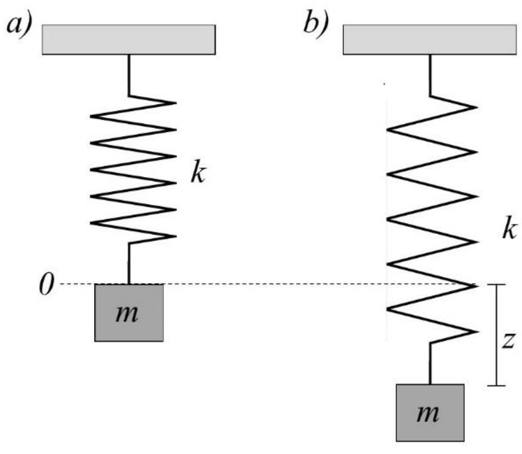

Figura 1.1: Sistema massa na vertical (a) na posição de equilíbrio e (b) estendido de z.

Um pêndulo simples, representado na Figura 1.2 é uma construção idealizada constituída de um corpo pontual de massa m suspenso por um fio inextensível de comprimento L e massa desprezível. Quando esse corpo é retirado lateralmente de sua posição de equilíbrio e solto, ele passa a oscilar em torno de sua posição de equilíbrio.

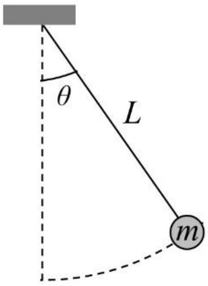

Figura 1.2: Pêndulo simples.

Considerando que o pêndulo é deslocado um pequeno ângulo θ com relação à sua posição de equilíbrio, mostra-se que o período de oscilação desse pêndulo, denominado T, é dado por:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{L}{g}}, \tag{1.3}$$

onde g é a aceleração da gravidade e L o comprimento do pêndulo.

1.3 Material Utilizado

Mola, blocos cilíndricos com gancho, barbante ou linha, régua, trena, balança, suportes e cronômetro.

1.4 Procedimento Experimental

1. Amarre um bloco em uma das extremidades de um barbante de aproximadamente dois metros. Amarre o barbante de forma que ele fique com aproximadamente 50 cm. Puxe o bloco um ângulo θ pequeno, conforme ilustra a Figura 1.2, e deixe o sistema oscilar cinco vezes. Repita o procedimento quatro vezes visando obter um resultado mais provável. Varie o comprimento do fio de 20 em 20 cm e para comprimento, meça o período de oscilação conforme descrito. Anote os valores na Tabela 1.1 e calcule, para cada comprimento do pêndulo, o valor mais provável para o período e o do desvio padrão.

Tabela 1.1:Valores medidos para o comprimento do pêndulo e o respectivo período de oscilação.

Comprimento (m)	T_1 (s)	T_2 (s)	T_3 (s)	T_4 (s)	$T_{Médio}$ (s)	σ (s)

2. Meça as massas dos blocos cilíndricos e da mola.
3. Utilizando os suportes, coloque uma mola na vertical e posicione a régua de forma que você consiga medir sua elongação.
4. Adicione os blocos cilíndricos, uma por vez, e meça a respectiva elongação da mola. Complete a Tabela 1.2 e informe a incerteza experimental em cada medida.

Tabela 1.2: Valores medidos para a massa dos blocos cilíndricos e a elongação da mola.

Número de blocos	Massa (kg)	z (m)
1		
2		
3		
4		
5		

5. Adicione novamente os blocos cilíndricos, um por vez. Para cada massa, puxe levemente o sistema de forma que o mesmo oscile com pequena amplitude. Para cada massa, marque o tempo gasto em cinco oscilações, divida esse resultado por cinco para determinar o período. Repita o procedimento quatro vezes visando obter um resultado mais provável. Anote esses valores na Tabela 1.3, assim como o período médio e o desvio padrão.

Tabela 1.3: Valores medidos para a massa dos blocos cilíndricos e o período de oscilação do sistema massa mola

Blocos	Massa (kg)	T_1 (s)	T_2 (s)	T_3 (s)	T_4 (s)	$T_{Médio}$ (s)	σ (s)
1							
2							
3							
4							
5							

1.5 Questionário

1. (Pré-relatório) Através da segunda lei de Newton e da lei de Hooke, deduza a Equação 1.1.
2. (Pré-relatório) Justifique por que esses experimentos devem ser realizados somente com pequenas oscilações.
3. (Pré-relatório) Considerando que a massa da mola é uniformemente distribuída e que a velocidade é uma função linear da posição, ou seja, $v(z) = z \cdot v_o/L$, onde v_o é a velocidade no final da mola e L seu comprimento, mostre que o valor de f na Equação 1.2 é $1/3$.
4. (Pré-relatório) Deduza a Equação 1.3.
5. Justifique por que o período não foi medido diretamente nos procedimentos 1 e 5.

6. Com os valores da Tabela 1.1, construa um gráfico de T ou T^2 em função do comprimento do pêndulo. Ajuste esses dados com a função matemática adequada e compare com a Equação 1.4. Dos coeficientes encontrados a partir do ajuste dos dados experimentais, estime o valor da aceleração da gravidade local.
7. Com os valores da Tabela 1.2, construa um gráfico de m em função de z. Ajuste esses dados com a função matemática adequada. Justifique sua escolha. Dos coeficientes encontrados a partir do ajuste dos dados experimentais, determine a constante elástica da mola.
8. Com os valores da Tabela 1.3, construa um gráfico de $T^2/4\pi^2$ em função de m. Justificando, ajuste esses dados com a função matemática adequada e compare com a Equação 1.2. Dos coeficientes encontrados a partir do ajuste dos dados experimentais, determine o valor de k e a massa efetiva da mola. Estime o valor de f e compare com o apresentado na literatura [2, 3]. Compare o valor de k com o valor encontrado no item anterior.

2 Equações Horárias no MHS e Oscilador Amortecido

2.1 Objetivo

Determinar as equações horárias para a posição, velocidade e aceleração de um corpo em movimento harmônico. Estudar a variação na amplitude de oscilação em pêndulo amortecido.

2.2 Fundamento Teórico

A posição $x(t)$ de um corpo que realiza um movimento harmônico simples pode ser descrito pela relação:

$$x(t) = A\cos(\omega t + \varphi)\,, \tag{2.1}$$

onde A, ω e φ são a amplitude, frequência angular e ângulo de fase, respectivamente. Partindo da Equação 2.1, mostra-se que a velocidade é dada por

$$v(t) = -A\omega\,\mathrm{sen}(\omega t + \varphi) \tag{2.2}$$

e a aceleração por:

$$a(t) = -A\omega^2\cos(\omega t + \varphi). \tag{2.3}$$

Em primeira aproximação, um oscilador harmônico amortecido, além da força restauradora, está sujeito a uma força não conservativa diretamente proporcional à velocidade [1]. Nesse caso, a posição em função do tempo é dada pela expressão:

$$x(t) = -Ae^{-\frac{b}{2m}t}\cos(\omega' t + \varphi), \tag{2.4}$$

onde b é chamado de constante de amortecimento e ω' a frequência angular das oscilações amortecidas.

2.3 Material Utilizado

Sensor de rotação PASCO, tripé e suporte, barra cilíndrica com massa acoplada e microcomputador com *software* CAPSTONE para a aquisição dos dados.

2.4 Procedimento Experimental

1. Meça as massas e as dimensões da barra cilíndrica e do peso acoplado.
2. Monte a barra e a massa como apresentado na Figura 2.1.
3. Conecte o sensor de rotação no microcomputador. Dê uma velocidade inicial ao pêndulo de forma que ele oscile com baixo ângulo (inferior a 10 graus). Colete os dados da posição, velocidade e aceleração em função do tempo com o *software* CAPSTONE. Deixe o pêndulo realizar aproximadamente cinco oscilações.
4. Repita o procedimento anterior, porém, deixe o pêndulo oscilar por aproximadamente cinco minutos. Tome cuidado para que a agentes externos como vibrações e ventos não influenciem no seu experimento. Dessa vez, colete apenas a posição em função do tempo.

2.5 Questionário

1. (Pré-relatório) Partindo da 2ª lei de Newton, deduza a Equação 2.1.
2. (Pré-relatório) Explique o significado de cada uma das grandezas físicas da Equação 2.1.
3. (Pré-relatório) Deduza as Equações 2.2 e 2.3.
4. (Pré-relatório) Deduza a Equação 2.4.

5. (Pré-relatório) Encontre uma expressão para ω' e discuta os casos de amortecimento crítico, superamortecimento e subamortecimento.
6. (Pré-relatório) Discuta a conservação da energia no oscilador harmônico amortecido e explique por que o termo de amortecimento não é conservativo.
7. (Pré-relatório) Discuta de quais grandezas físicas a constante de amortecimento tem dependência.
8. Monte um gráfico de $x(t)\ versus\ t$ e ajuste os dados do procedimento 3 com uma expressão que esteja de acordo com a teoria apresentada. Partindo do ajuste, determine a amplitude, a frequência angular e fase inicial do sistema.
9. Monte um gráfico de $v(t)\ versus\ t$ e $a(t)\ versus\ t$. Ajuste esses dados uma expressão que esteja de acordo com a teoria apresentada. Compare os parâmetros fornecidos pelo ajuste com os valores esperados.
10. Monte um gráfico de $x(t)\ versus\ t$ e ajuste os dados do procedimento 4 com uma expressão que esteja de acordo com a teoria apresentada. Partindo do ajuste, determine a amplitude, a constante de amortecimento e a frequência angular para oscilações amortecidas e fase inicial do sistema.

Figura 2.1: Esquema da montagem do experimento.

3 Método de Bessel

3.1 Objetivos

Determinar a distância focal de uma lente convexa (convergente) através da equação dos pontos conjugados para lentes esféricas delgadas e através do método de Bessel.

3.2 Fundamento Teórico

Se um objeto (vela da Figura 3.1) está a uma distância D de um anteparo sobre o qual se projeta uma imagem com lente convergente. Observa-se que há duas distâncias p e q entre a lente e a vela para as quais se obtém uma imagem nítida da vela no anteparo. Seja d a diferença entre estas duas posições, e p_0 e q_0 são as distâncias entre a lente e o anteparo (posição das imagens), em cada caso.

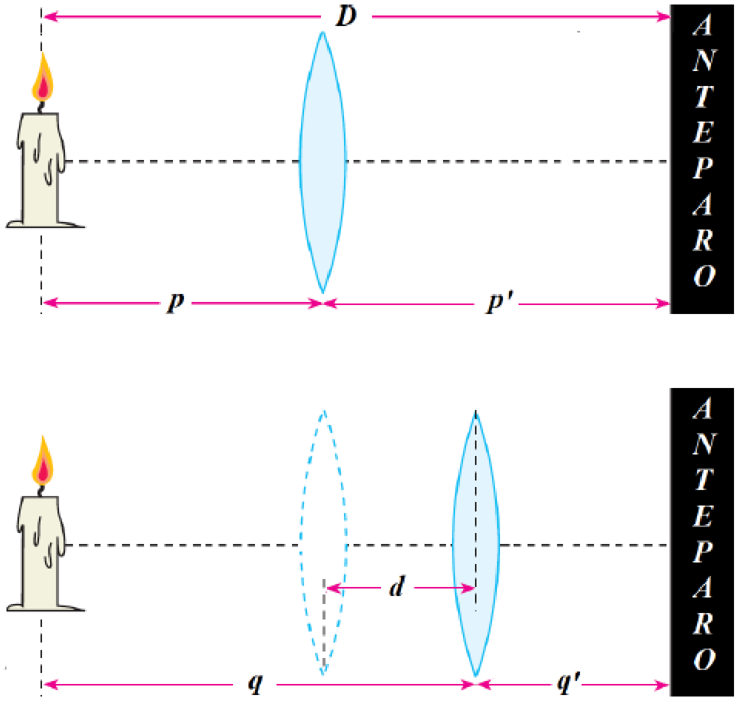

Figura 3.1: Método de Bessel. Adaptado da Ref. [4].

Portanto, para uma distância fixa D entre o objeto e um anteparo, existem duas posições da lente que produzem uma imagem nítida do objeto sobre o anteparo. Neste caso, pode-se provar que a distância focal da lente é dada por:

$$f = \frac{D^2 - d^2}{4D}. \tag{3.1}$$

Essa expressão é denominada fórmula de Bessel e a partir dela pode-se determinar a distância focal de uma lente convergente.

3.3 Material Utilizado

Fonte de Luz com fonte de alimentação DC 12V/2A , chapa (Diafragma) com letra F, lentes de vidro convexas de focos 50 mm e 12 cm, chapa (Diafragma) com 5 fendas, quatro fixadores metálicos (Cavaleiros) e régua.

3.4 Procedimento Experimental

1. Colocar a lente colimadora (*f* = 12 cm) e o diafragma de cinco fendas no mesmo cavaleiro logo em frente à fonte.
2. Ligar a fonte de luz e movimentar o cavaleiro de maneira a obter um feixe de raios luminosos paralelos.
3. Remover o diafragma de cinco fendas, sem movimentar a fonte ou a lente. Coloque o diafragma em outro cavaleiro.
4. Coloque a fenda com a letra *F* (o objeto) em outro cavaleiro e o posicione logo em frente à lente colimadora.
5. Coloque o diafragma de 5 fendas (anteparo) separado por uma distância *D* = 200 mm do objeto (letra *F*).
6. Exatamente no ponto médio entre o anteparo e o objeto coloque uma lente de vidro biconvexa de foco *f* = 50 mm.
7. A sua montagem deve estar como a Figura 3.2.

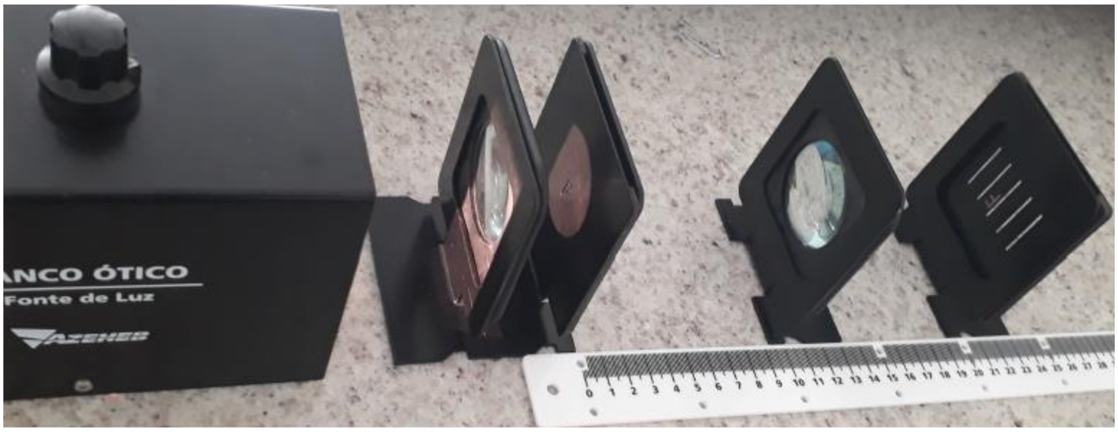

Figura 3.2: Montagem do banco óptico.

No anteparo deve estar projetada a imagem nítida da letra *F*, que deve estar invertida (lados direito com esquerdo e de cabeça para baixo). A imagem deve ter o mesmo tamanho do orifício (objeto) *F*. Se necessário, ajuste a lente no cavaleiro (movendo-a para direita, para esquerda, para cima ou para baixo, sem mover o cavaleiro) de modo que a luz passe o mais próximo possível do centro da lente. Neste caso, a distância entre o objeto e a lente (p) e entre a imagem e a lente (p') são ambas iguais a 100 mm. Descolando a lente a imagem cará sempre borrada. Ou seja, não há distância entre duas possíveis imagens nítidas (d = 0). Conforme a primeira coluna da Tabela 3.1.

8. Mantendo o objeto fixo (orifício *F*), mova o anteparo de 10 mm no sentido contrário a lente. Ou seja, faça a distância entre objeto e anteparo ser *D* = 210 mm. Caso necessário, reajuste a lente no cavaleiro para que o raio luminoso passe pelo centro da lente.
9. Desloque lentamente a lente entre o objeto e o anteparo, no sentido do objeto, você deverá perceber que a imagem começará a ficar cada vez mais nítida e depois perderá a nitidez (borrará). A posição da lente logo antes da imagem começar a borrar é posição para a qual a forma-se uma imagem mais nítida possível da letra *F* (do objeto) sobre o anteparo. Anote os valores da distância entre o objeto e a lente *(p)* e entre a imagem e a lente (p') na Tabela 3.1. Note

que, $p' = D - p$. Para o caso D = 210 mm, os valores teóricos esperados são p = 82 mm e p' = 128 mm.

Tabela 3.1: Dados experimentais.

D (mm)	200	210	220	230	240	250	260	270	280	290	300	310
p (mm)	100											
p´ (mm)	100											
d (mm)	0											
f (mm)	50											

10. Desloque lentamente a lente entre o objeto e o anteparo, no sentido do anteparo, a imagem da letra *F* começara a diminuir até que em um certo ponto estará bastante nítida e menor que o objeto, e então perderá novamente a nitidez. Encontre o ponto onde se forma essa outra imagem nítida da letra *F* sobre o anteparo. Anote na Tabela 3.1, a distância *d* que a lente foi deslocada, ou seja a distância entre as duas posições da lente para as quais se formaram imagens nítidas. Para o caso D = 210 mm, o valor teórico esperado é d = 46 mm.
11. Fixe outras dez posições diferentes (conforme indicado na Tabela 1) da distância objeto - anteparo (D) e para cada caso determine as distâncias p, p' e d correspondentes, seguindo os passos 9 e 10. Complete a Tabela 3.1 com esses valores.
12. Use a Equação 3.1 para calcular os focos para cada caso. Anote os valores de f na última linha da Tabela 3.1.

3.5 Questionário

1. Calcule o foco médio $\bar{f}$, bem como o desvio padrão σ_f dos dados da Tabela 3.1 e forneça o valor do foco com seu erro experimental $\left(f = \bar{f} \pm \sigma_f\right)$.
2. Calcule o erro relativo e o erro absoluto envolvido na medida de *f*. Note o valor do foco informado pelo fabricante é f = +50 mm. O desvio padrão é menor ou maior do que o erro relativo?
3. Faça um gráfico de $y = \frac{1}{p}$ em função de $y = \frac{1}{p'}$. Qual o comportamento deste gráfico?
4. Monte uma tabela com os valores de $y = D^2 - d^2$ e construa o gráfico de y em função de D. Qual o comportamento deste gráfico?
5. (Pré-relatório) A determinação da reta que melhor (passa por) se ajusta a pontos experimentais em um plano *x*-*y* pode ser obtida por meio da utilização do Método dos Mínimos Quadrados (MMQ).
   (a) Para uma reta que passa pela origem, do tipo $y = ax$, é possível mostrar que devemos ter [5];

$$a = \frac{\overline{xy}}{\overline{\overline{x^2}}} = \frac{\sum_i x_i y_i}{\sum_i x_i^2}, \tag{3.2}$$

   na qual o somatório em i deve ver feito sobre todas as medidas.

   (b) Para uma reta do tipo $y = -x + b$, pode-se demonstrar que:

$$b = \frac{\overline{xy} + \overline{x^2}}{\bar{x}} = \frac{\sum_i x_i y_i + \sum_i x_i^2}{\sum_i x_i}\,, \tag{3.3}$$

na qual o somatório em i deve ver feito sobre todas as medidas.

6. Para os itens 3 e 4, recalcule a distância focal f da lente usando o MMQ. Compare novamente o valor obtido com valor informado pelo fabricante. Esboce nos mesmos gráficos dos itens 3 e 4 as retas de regressão linear obtidas pelo MMQ (use linhas contínuas nos gráficos).
7. (Pré-relatório) Usando a equação dos pontos conjugados de Gauss $\frac{1}{f} = \frac{1}{p} + \frac{1}{p\prime}$, demostre a Equação 3.1. Dica: Use o princípio da reversibilidade do raio luminoso para concluir que $d = p' - p$.
8. Compare os valores de $p' - p$ e d obtidos experimentalmente.
9. (Pré-relatório) Demonstre que as distâncias entre o objeto e a lente (p) e entre o anteparo e a lente (p'), podem ser dadas por:

$$p = \frac{D - \sqrt{D^2 - 4Df}}{2} \; e \; p' = \frac{D + \sqrt{D^2 - 4Df}}{2}. \tag{3.4}$$

10. Use a equação acima para calcular os valores teóricos de (p) e (p'). Compare esses valores com os dados experimentais.

4 Refração da Luz

4.1 Objetivos

Verificar a validade experimental da lei de Snell-Descartes. Observar o fenômeno da reflexão total. Investigar a trajetória de feixes luminosos em lentes esféricas. Analisar a rotação do plano de polarização de um feixe luminoso.

4.2 Fundamento Teórico

Considere um feixe de luz monocromática I propagando-se de um meio 1 para outro meio 2. O raio incidente forma com a normal à superfície de separação S dos meios, um ângulo $\hat{\imath}$ (ângulo de incidência). Parte do raio é refletido com um ângulo com a normal também igual a $\hat{\imath}$ (ângulo de reflexão), e parte da luz é refratada (R) formando com a normal um ângulo $\hat{r}$ (ângulo de refração), conforme ilustra a Figura 4.1.

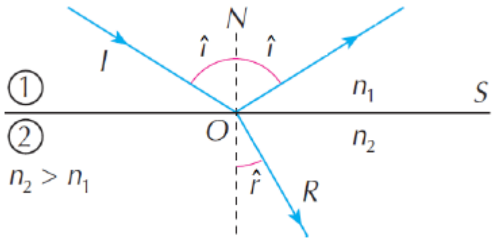

Figura 4.1: Raio de luz incidindo na superfície de separação de dois meios: o raio se aproxima da normal ao passar do meio menos refringente para o mais refringente. Figura adaptada da Ref. [4].

A normal N à superfície de separação e os raios incidente, refletido e refratado pertencem ao mesmo plano. Além disso a relação entre os ângulos de incidência e refração é dada pela lei de Snell-Descartes

$$n_1 sen\, \hat{\imath} = n_2\, sen\, \hat{r}, \tag{4.1}$$

sendo n_a (a = 1; 2) o índice de refração, ou refringência, do meio a, que é a razão entre a velocidade da luz no vácuo c e a velocidade da luz no meio em questão, ou seja;

$$n_a = \frac{c}{v_a}. \tag{4.2}$$

James Clerk Maxwell mostrou que um feixe de luz é uma onda propagante de campos elétrico e magnético (que oscilam com mesma frequência) e são mutuamente perpendiculares à direção de propagação. Veja Figura 4.2a. Como toda onda transversal, a onda eletromagnética pode ser não polarizada ou polarizada. No caso mecânico, ao movimentar uma corda lateralmente e para cima e para baixo, gera-se na corda uma onda denominada não polarizada. Nesse caso, as partes constituintes do meio de propagação (a corda) oscilam em várias direções, perpendiculares à direção de propagação da onda. Ao passar por uma fenda, todas as partes do meio oscilam em um mesmo plano e a onda é chamada de polarizada, conforme Fig. Figura 4.2b. A direção de polarização da onda eletromagnética é a direção de oscilação do campo elétrico. Para a luz visível, um dos filtros polarizadores mais comum é o material conhecido pela marca registrada Polaroide. Na Figura 4.2c mostramos um esquema de um filtro polarizador iluminado por uma luz natural não polarizada (campo elétrico $\vec{E}$ aponta em todas as direções perpendiculares à direção de propagação). A onda transmitida, por outro lado, é linearmente polarizada na direção do eixo polarizador do Polaroide.

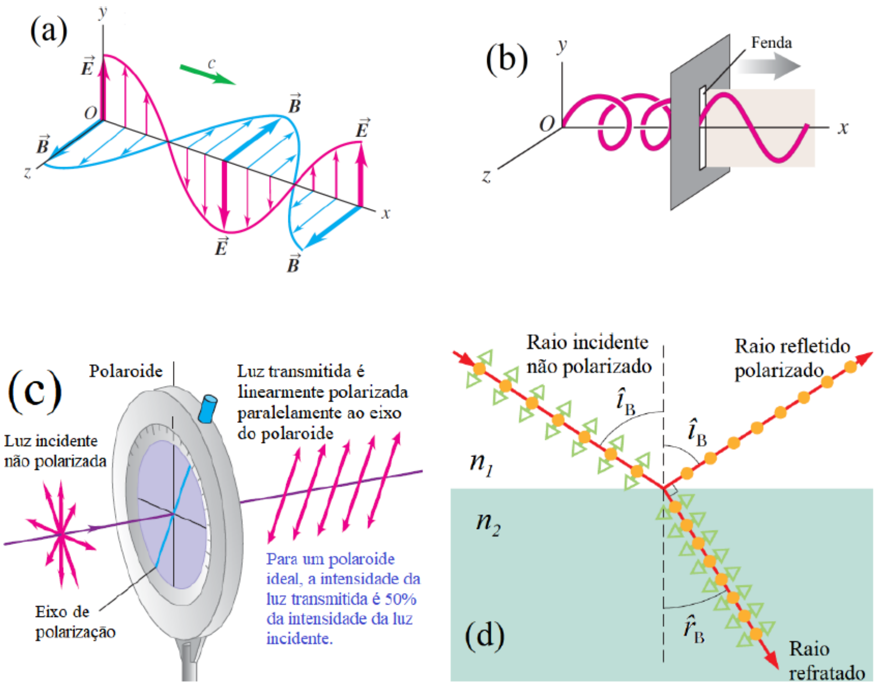

Figura 4.2: (a) Onda eletromagnética. (b) Polarização de uma onda mecânica. (c) Polarização de uma onda eletromagnética. (d) Polarização por reflexão. Figuras (a) - (c) foram adaptadas da Ref. [6] e a Figura (d) foi adaptada da Ref. [7].

Uma luz não polarizada também pode ser polarizada por reflexão. Na Figura 4.2d, mostra-se um raio de luz não polarizado que incide sobre a superfície que separa dois meios. Pode-se dividir o vetor campo elétrico da luz incidente em duas componentes: perpendicular ao plano de incidência, o plano do papel, (representados como pontos na figura) e paralela ao plano de incidência (setas). Em geral a luz refletida contém as duas componentes, mas com magnitudes diferentes, ou seja, ela é parcialmente polarizada. Entretanto, existe um ângulo para o qual o raio refletido é totalmente polarizado perpendicularmente ao plano de incidência, este ângulo é conhecido como ângulo de Brewster.

4.3 Material Utilizado

Barramento (Barra de montagem), transferidor metálico (Disco óptico), fonte de Luz com fonte de alimentação DC 12V/2A, base para transferidor metálico, lentes de vidro convexas (colimadora) de foco 12 cm, lente de acrílico semi-circular, fixadores metálico (Cavaleiros), folhas de papel quadriculado, chapa (Diafragma) com 5 fendas, polaroides rotacionais, chapa (Diafragma) com 1 fenda, lentes planas biconvexa e bicôncava, chapa (Diafragma) com letra F, paquímetro, lentes de vidro convexas de focos 50 mm e 100 mm e régua.

4.4 Procedimento Experimental

Parte I – Lei de Snell-Descartes

1. Coloque a lente colimadora (f = 12 cm) e o diafragma de cinco fendas no mesmo cavaleiro logo em frente à fonte (que deverá estar sobre o barramento).

2. Coloque o transferidor metálico (disco óptico) sobre a sua base. Note que um dos lados da base é menor do que o outro. Coloque o disco óptico e a base no barramento. A parte mais baixa da base deve estar virada para o lado da fonte de luz.
3. Ligue a fonte de luz e movimente o cavaleiro de maneira a obter um feixe de raios luminosos paralelos.
4. Substitua o diafragma de cinco fendas, sem movimentar a fonte ou a lente, por um de fenda única.
5. Ajuste a posição do disco óptico para que o raio luminoso coincida com o eixo 0-0 do transferidor.
6. Coloque a lente plana semi-circular de acrílico sobre o disco óptico. A face plana da mesma deve estar voltada para a fonte luminosa, e deve estar sobre o eixo 90-90 do tranferidor. Além disso, a lente deve ser colocada simetricamente com relação ao eixo 0-0, isto é, o eixo 0-0 deve passar exatamente sobre o eixo raio da lente. A sua montagem deve estar como a apresentada na Figura 4.3:
7. Gire o disco óptico de modo que o feixe incidente não desvie ao passar pela lente semi-circular. Ou seja, faça os ângulos de incidência e refração iguais a zero.
8. Girar o disco óptico e completar a Tabela 4.1 a seguir (anotar os valores dos ângulos de refração $\hat{r}$ no laboratório e seguir para a Parte II):

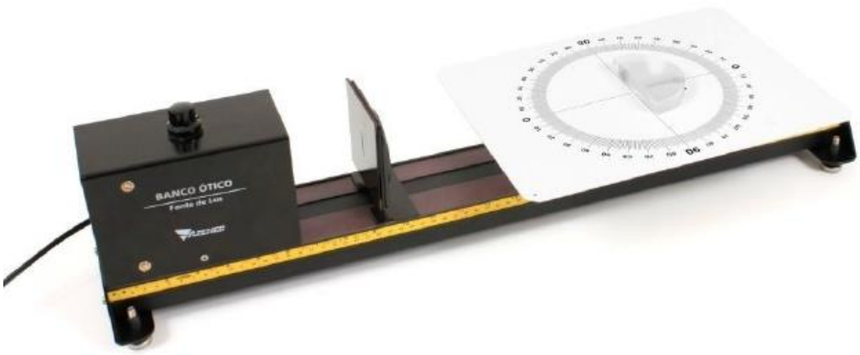

Figura 4.3: Montagem do banco óptico. Figura retirada da Ref. [8].

Na última linha da Tabela 4.1, calcular $n_{ac./ar} = \frac{sen\,\hat{\imath}}{sen\,\hat{r}}$, para cada par de $\hat{\imath}$ e $\hat{r}$. Por fim na última coluna desta linha colocar o valor médio do índice de refração.

Tabela 4.1: ângulo de incidência $\hat{\imath}$ e de refração $\hat{r}$.

$\hat{\imath}$	10º	20º	30º	40º	50 º	60 º	70 º	80 º	Valor médio do índice de refração $\bar{n}_{ac./ar}$
$sen\,\hat{\imath}$									
$\hat{r}$									
$sen\,\hat{r}$									
$n_{ac./ar}$									

Parte II – Reflexão Interna Total

1. Gire o disco óptico de modo que a face curva do semicilindro de acrílico fique voltada para a fonte luminosa, conforme Figura 4.4.

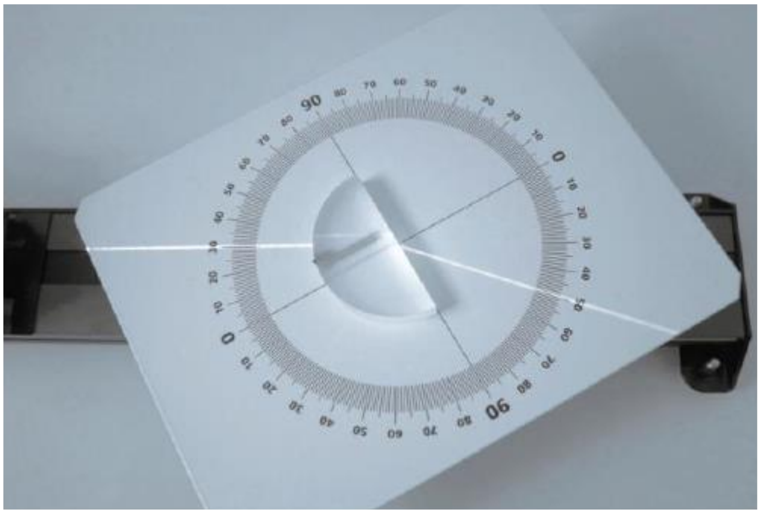

Figura 4.4: Refração de um raio luminoso ao passar do acrílico para o ar. Retirada da Ref. [8].

2. Ajuste a posição da lente semi-circular de modo que o ângulo de incidência e o ângulo de refração sejam iguais à zero (o centro do semicilindro deve coincidir com o centro do disco óptico e a face reta deve coincidir com o eixo 90-90). Para este posicionamento o eixo 0-0 do disco é a reta normal à superfície que separa o ar do acrílico.
3. O feixe luminoso que incide obliquamente, se aproxima ou se afasta da normal ao atravessar do acrílico para o ar? Então qual meio é menos refringente? (Relatório).
4. Girar o disco óptico de modo que o raio refratado desapareça ($\hat{r} \rightarrow 90°$) e anotar o ângulo de incidência para esse caso.

Parte III – Aberração Esférica em uma Lente Convergente

1. Coloque sobre o disco óptico uma folha de papel quadriculado. Coloque a lente semicircular sobre a folha e trace na folha o perfil da lente. Trace também o eixo óptico da lente (eixo de simetria).
2. Gire o disco óptico de modo que o feixe de luz incida na parte circular da lente. Ajuste a posição da lente de modo que o raio luminoso passe exatamente sobre o eixo óptico da lente. Nesse caso não deve haver desvio do feixe luminoso.
3. Ajuste a posição da lente de modo que o raio luminoso cruze o eixo óptico, incida na face esférica e emerja perpendicularmente à face plana, a uma distância x = 0,5 cm do eixo óptico, como mostra a Figura 4.5:

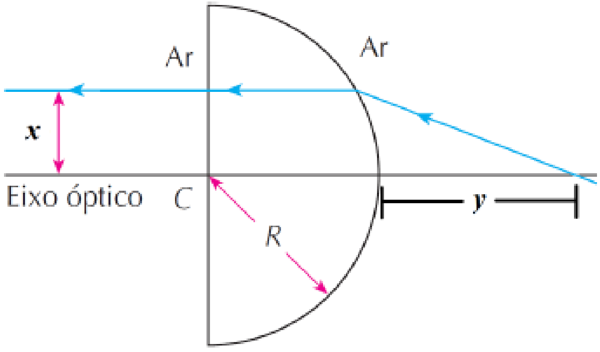

Figura 4.5: Lente plano-convexa (semicircular). Figura adaptada da Ref. [4].

4. À lápis, marque na folha de papel pelo menos quatro pontos distintos de cada feixe luminoso (incidente e refratado), retire a lente e trace os raios usando uma régua.
5. Disponha a lente sobre o disco óptico e o ajuste para reverter a trajetória da luz. Isto é observe, que se o raio incidir paralelamente ao eixo óptico, passando a x = 0,5 cm do eixo óptico o feixe que emerge da face circular intercepta o eixo óptico seguindo a trajetória desenhada.
6. Se as duas trajetórias coincidiram, retire a lente, trace o raio luminoso à caneta, meça a distância y entre a lente e o ponto de interseção do feixe luminoso com o eixo óptico e anote esse valor na Tabela 4.2. Repita os passos 3 a 6 para os outros valores de x mostrados na Tabela 4.2, completando-a. Caso os dois raios não coincidam repita os passos 3 a 6 para o mesmo valor de x. Observações: (a) Use canetas de diferentes cores para diferenciar cada caso. (b) Complete a tabela até não haver mais raio emergente.
7. Utilize um paquímetro para medir o raio e a altura (diâmetro) da lente e anote esses valores.

Tabela 4.2: Distância do eixo óptico x e correspondente distância y.

x (cm)	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0
y (cm)								

Parte IV – Distância Focal de Lentes Esféricas

1. Coloque sobre o disco óptico uma folha de papel quadriculado nova. Coloque a lente biconvexa sobre a folha e trace na folha o perfil da lente, bem como o seu eixo óptico (eixo de simetria).
2. Gire o disco óptico e ajuste a posição da lente de modo que o feixe de luz passe exatamente pelo eixo óptico da lente. Nessa situação o raio luminoso não sofrerá qualquer desvio.
3. Ajuste a posição da lente fazendo com que o feixe luminoso cruze o eixo óptico, incida sobre a lente e emerja paralelamente ao eixo óptico, a uma distância x = 0,5 cm do mesmo. Veja Figura 4.6a.
4. Marque, usando um lápis, pontos distintos dos feixes incidente e emergente, retire a lente e trace os raios.

5. Recoloque a lente sobre o disco óptico, gire o mesmo revertendo a trajetória da luz. Isto é, observe que, se o feixe incidir paralelamente ao eixo óptico, passando a x = 0,5 cm do eixo óptico, o raio que emerge interceptará o eixo óptico seguindo a trajetória desenhada. Analogamente ao esquema da Figura 4.6b.
6. Se as duas trajetórias coincidiram, retire a lente e trace o feixe luminoso à caneta. Caso contrário, repita os passos 3 a 6 para o mesmo valor de x.
7. Repita os passos 3 a 6 para x = 1,0 cm, x = 1,5 cm, x = 2,0 cm e x = 2,5 cm. Observação: Novamente, use canetas com cores diferentes para diferenciar cada caso.
8. Note que os raios convergem para uma certa vizinhança. Use uma régua para estimar a distância f entre o centro da lente e o ponto onde os feixes convergem.
9. Usando um paquímetro, obtenha todas as dimensões da lente: sua altura, base e espessura, ver Figura 4.6c.

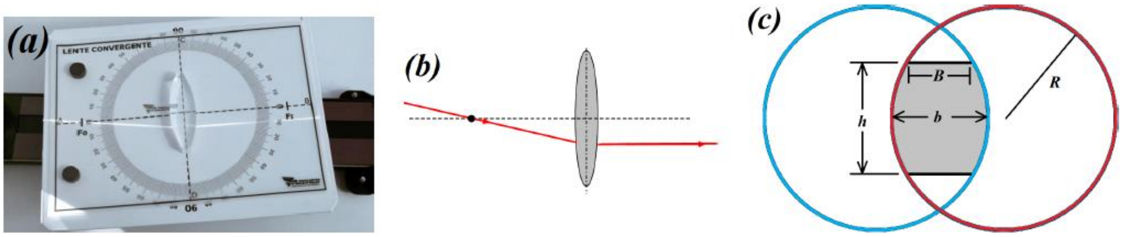

Figura 4.6: Lente esférica biconvexa: (a) Aparato experimental; (b) Esboço teórico da trajetória do raio de luz; (c) Esquema de construção da lente. As Figuras (a) e (b) foram retiradas da Ref. [8].

10. Coloque outra folha modelo sobre o disco, disponha agora a lente bicôncava sobre a folha e desenhe o seu perfil. Usando uma régua, trace também o eixo óptico da lente. Ajuste o disco óptico de modo que o raio luminoso incida sobre eixo óptico da lente. Novamente, não deverá ocorrer um desvio do feixe luminoso nessa situação.
11. Seguindo o modelo da Figura 4.7a, abaixo, regule o disco óptico de modo que o raio incidente ao atingir a lente emerja paralelo ao eixo óptico e a uma distância x = 0,5 cm do mesmo. Note que agora o feixe incidente não cruza o eixo óptico.

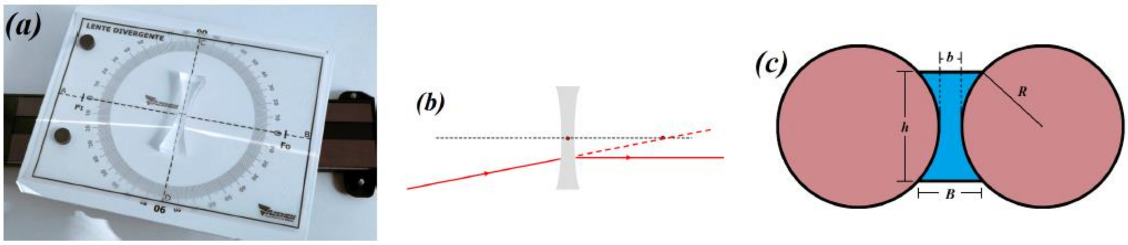

Figura 4.7:Lente esférica bicôncava: (a) Montagem experimental; (b) Esboço dos feixes incidente e emergente; (c) Método de obtenção da lente. As Figuras (a) e (b) foram retiradas da Ref. [8].

12. Á lápis, marque na folha de papel pontos distintos dos raios, retire a lente e complete a trajetória dos feixes luminosos usando uma régua.
13. Reposicione a lente sobre a folha, reverta a trajetória da luz e observe se o raio ao incidir paralelamente ao eixo óptico irá emergir seguindo a trajetória desenhada.
14. Se as trajetórias se igualarem, use uma caneta para traçar o feixe de luz. Se as duas trajetórias forem distintas, refaça os passos anteriores. Finalmente, repita os procedimentos acima para valores de x iguais a 1,0 cm, 1,5 cm e 2,0 cm.
15. Note que os feixes divergem. Como no exemplo da Figura 4.7b, use uma régua e pontilhe os prolongamentos dos raios incidentes (não paralelos). Observe que os prolongamentos se interceptam em um ponto virtual (na verdade, numa certa vizinhança, devido à aberração esférica). Utilize uma régua para avaliar a distância $|f|$ entre o centro da lente e o ponto onde os prolongamentos dos raios interceptam o eixo óptico.
16. Por fim, com um paquímetro, meça todas as dimensões da lente: sua altura, base e espessura, conforme a Figura 4.7c.

Parte V – Polarização por Reflexão

1. Colocar a lente colimadora (f = 12 cm) e o diafragma de cinco fendas no mesmo cavaleiro logo em frente à fonte.
2. Ligar a fonte de luz e movimentar o cavaleiro de maneira a obter um feixe de raios luminosos paralelos.
3. Remover o diafragma de cinco fendas, sem movimentar a fonte ou a lente. Coloque o diafragma em outro cavaleiro.
4. Coloque a fenda com a letra *F* em outro cavaleiro e o posicione logo em frente à lente colimadora.
5. Coloque o diafragma de 5 fendas separado por uma distância D = 400 mm do objeto (letra *F*).
6. Exatamente no ponto médio entre o anteparo e o objeto coloque uma lente de vidro biconvexa de foco f = 100 mm. A sua montagem deve estar como na Figura 4.8a.
7. Insira um filtro polarizador P_1 entre o orifício *F* e a lente de 100 mm e outro P_2 entre a mesma lente e o anteparo, conforme esquema da Figura 4.8b.
8. Ajuste os eixos dos dois Polaroides em 90°. Nessa condição no anteparo a letra *F* deve estar bem iluminada. Gire gradualmente o eixo polarizador do primeiro polaróide (P_1, o mais próximo da lente colimadora) até 180°. Você deverá perceber que a intensidade da projeção luminosa da letra *F* diminui até desaparecer totalmente quando os dois Polaroides têm seus eixos rotacionais cruzados (fazendo 90° entre si).
9. Mantendo os Polaroides P_2 em 90° e P1 em 180°, insira um terceiro polaróide P_3 com polarização em 90° entre P_1 e a lente de 100 mm. Veja Figura 4.8c.
10. O anteparo deverá continuar não iluminado. Gire gradualmente o eixo polarizador de P_3. Note que a projeção luminosa começará a aumentar a sua intensidade. Depois a intensidade começará a diminuir até que a projeção desaparece novamente quando P_3 atinge 180°.

11. Anote a posição do eixo de polarização P_3 para a qual a projeção luminosa tem máxima intensidade.
12. Mantendo o Polaroide P_2 em 90°, fixe P_1 em 160° e P_3 em 90°. Gire gradualmente P_3 até a polarização de P_1. Observe que novamente a intensidade da projeção primeiro aumenta, depois começa a diminuir e desaparece quando P_3 atinge a polarização de P_1. Para qual posição de P_3 a intensidade da projeção luminosa é máxima? Anote esse valor.

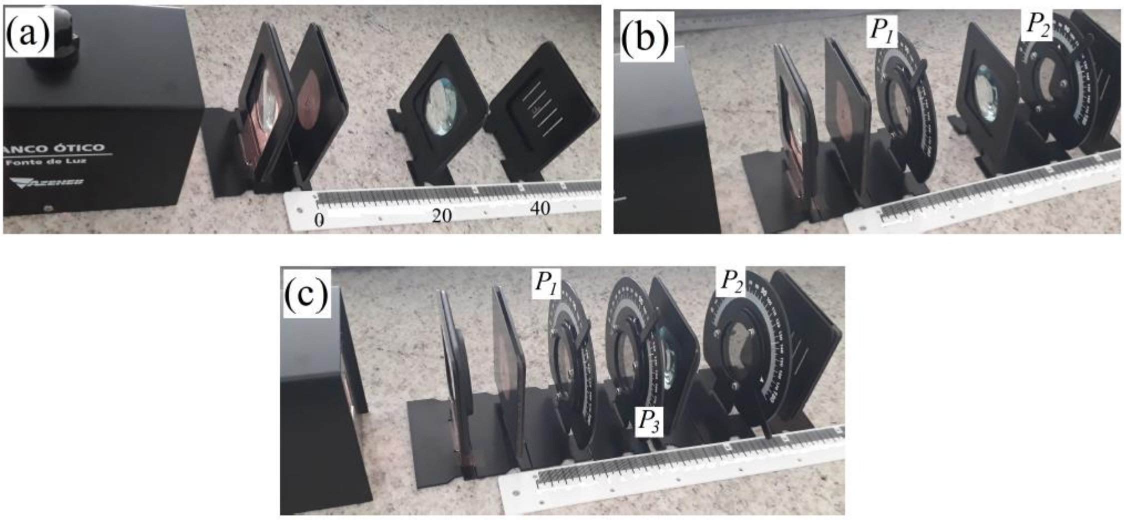

Figura 4.8: Aparato experimental para o estudo da polarização da luz: (a) montagem experimental inicial;(b) e (c) equipamentos com dois e três filtros polarizadores, respectivamente.

13. Repita o passo 12 fixando P_1 em outros dois valores à sua escolha.
14. Remova todos os equipamentos, exceto a fonte de luz e a lente colimadora. Confira se a lente colimadora continua alinhada, caso contrário use o diafragma de 5 fendas para isso. Coloque novamente o diafragma com apenas uma fenda no cavaleiro da lente colimadora. Sobre o disco óptico, coloque a lente semicircular. Usando um Polaroide (com eixo polarizador em 90°) e um anteparo, monte o esquema mostrado na Figura 4.9.

Figura 4.9: Banco ótico montado para o estudo da polarização da luz por re exão. Figura adaptada da Ref. [8]

15. Gire o disco óptico de modo que os ângulos de incidência e reflexão sejam de 20°. Coloque o Polaroide (analisador) e o anteparo na direção do raio refletido e observe a projeção do raio refletido no anteparo, após atravessar o Polaroide. Caso a intensidade do feixe esteja muito fraca, use sua mão como anteparo.
16. Gire gradualmente o eixo do Polaroide em 90° (até seu polarizador atingir 0° ou 180°) e observe a projeção do feixe luminoso no anteparo. A intensidade da luz aumenta, diminui ou permanece a mesma à medida que o eixo de polarização muda? Por que isso ocorre? (Comentar no relatório). Retorne o Polaroide para a posição inicial.
17. Encontre um ângulo de incidência e reflexão $\hat{\imath}_B$, entre 50° e 60°, de tal forma que ao girar o Polaroide para 0° ou 180° a mancha luminosa projetada desaparece. Ou seja, existe um ângulo $\hat{\imath}_B$ (chamado de ângulo de Brewster) para o qual a luz fica totalmente polarizada. Qual é o valor de $\hat{\imath}_B$?
18. Meça o correspondente ângulo de refração $\hat{r}_B$, bem como o ângulo entre o raio refletido e o raio refratado.

4.5 Questionário

Parte I – Lei de Snell-Descartes

1. Calcular o desvio padrão do índice de refração σ_n e fornecer o valor do mesmo com seu erro experimental ($n = \bar{n} \pm \sigma_n$). Comparar o valor experimental com o valor tabelado de 1,50 (Calcule os erros relativo e absoluto envolvidos na medida).
2. Faça um gráfico de $y = sen\,\hat{r}$ em função de $x = sen\,\hat{\imath}$. Comente o comportamento desse gráfico.
3. Ajuste os dados com uma função matemática adequada.
4. Calcule o índice de refração usando a regressão linear acima e compare o resultado com o valor experimental.
5. Os raios luminosos, do ar para a lente, que incidem obliquamente se aproximam ou se afastam da normal? Justifique.
6. Quando o feixe incidente coincide com a reta normal ocorre refração? Justifique.
7. Em que meio a velocidade da luz é menor?
8. O eixo 0-0 é a reta normal à superfície que separa o ar do acrílico. Justifique.
9. Quando o feixe emerge do acrílico para o ar, através da parte circular, ele nunca sofre um segundo desvio. Justifique.

Parte II – Reflexão Interna Total

1. Como é chamado o ângulo incidente obtido no passo 4 desta parte?
2. Calcular o valor teórico para esse ângulo usando o índice de refração obtido na Parte I. Compare com o resultado experimental.
3. Comente quais as condições para que o raio refratado desapareça como no procedimento
4. Isso pode ocorrer na Parte I do experimento? Justifique.

Parte III – Aberração Esférica em uma Lente Convergente

1. (Pré-relatório) Mostrar que se o índice de refração da lente é n, devemos ter

$$y = \frac{n}{n^2-1}\left(\sqrt{R^2 - n^2x^2} + n\sqrt{R^2 - x^2}\right) - R \qquad (4.3)$$

na geometria da Figura 4.5.

2. Utilize o índice de refração obtido na parte I deste experimento e a equação acima para calcular os valores teóricos esperados de y. Compare com os resultados experimentais.

Parte IV – Distância Focal de Lentes Esféricas

1. Como são chamadas as distâncias jfj obtidas nos itens 8 e 15 do procedimento experimental? Qual é a convenção gaussina do sinal de f para cada uma das lentes usadas?
2. (Pré-relatório) Demonstrar que as geometrias da Figura 4.6c e Figura 4.7c implicam que:

$$R = \frac{h^2 + (B-b)^2}{4|B-b|} \qquad (4.4)$$

3. Utilizar a equação acima e as dimensões de cada uma das lentes para se obter o raio curvatura R das faces de cada uma das lentes.
4. Usando que o índice de refração do acrílico das lentes é n = 1,50, o raios de curvatura calculados no item acima, bem como a chamada equação dos fabricantes de lente [9, 10, 11].

$$\frac{1}{f} = (n-1)\left[\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} - \frac{(n-1)b}{nR_1R_2}\right] \qquad (4.5)$$

calcule os focos *f* das lentes. Na equação acima, R_a, com *a* = 1, 2, são os raios das faces da lente, além, por convenção tem-se que com $R_a > 0$ ($R_a < 0$) para faces convexas (côncavas), b é a espessura da lente ao logo do seu eixo óptico, ver Figura 4.6c e Figura 4.7c.

5. Compare o valor teórico obtido acima com a estimativa experimental. **Observação:** Anexar as folhas de papel quadriculado das partes III e IV ao Relatório.

Parte V – Polarização por Reflexão

1. (Pré-relatório) Considere dois Polaroides cujos eixos polarizadores fazem um ângulo entre si. A luz ao passar pelo primeiro Polaroide é polarizada na direção do seu eixo, ao passar pelo segundo Polaroide a razão entre as intensidades da luz que emerge *I* e incide I_0 sobre o mesmo é igual a

$$\frac{I}{I_0} = \cos^2\alpha \qquad (4.6)$$

Esse fenômeno é conhecido como lei de Malus. Mostre que se um terceiro filtro polarizador é inserido entre os dois primeiros, a intensidade da luz transmitida é máxima quando o Polaroide inserido no meio tem sua direção de polarização fazendo exatamente um ângulo $\frac{\alpha}{2}$ com os dois filtros das extremidades.

2. Compare a previsão teórica obtida acima com os resultados experimentais obtidos nos passos 9 a 13 da parte experimental.
3. (Pré-relatório) Mostre que, se para o ângulo $\hat{\imath}_B$ (chamado de ângulo de Brewster ou ângulo de polarização) os feixes de luz refletido e refratado são perpendiculares entre si, então a tangente de $\hat{\imath}_B$ é igual ao índice de refração do material.
4. Calcule a tangente do ângulo de Brewster obtido no procedimento 17 da parte experimental. Compare esse valor com o índice de refração do acrílico fornecido pelo fabricante da lente (n = 1,50) e com o valor obtido experimentalmente na Parte I desse experimento.
5. Qual a direção de polarização da luz refletida no passo 17 da parte experimental? O que ocorreu com a componente da luz que não apareceu na reflexão?

5 Princípio de Arquimedes

5.1 Objetivos

Estudar o efeito do empuxo em corpos e determinar a densidade de dois líquidos através do princípio de Arquimedes.

5.2 Fundamento Teórico

Quando um corpo é mergulhado em um fluido qualquer, ele fica sujeito a uma força contrária à força gravitacional. Essa força, que recebe o nome de empuxo e será representada por E, se origina devido à diferença de pressão entre as diferentes partes do corpo e seu módulo pode ser escrito como:

$$E = \rho g V, \tag{5.1}$$

onde ρ é a densidade do fluido, g a aceleração da gravidade e V o volume do corpo.

Considere um experimento onde um corpo de massa m em equilíbrio estático pendurado por um dinamômetro e submerso em fluido de densidade ρ, conforme ilustra a Figura 5.1. Esse corpo está sujeito à ação de três forças, o peso P, empuxo E e a força que o dinamômetro, chamada aqui de P'. Com essas considerações, tem-se que:

$$P' = P - \rho g V. \tag{5.2}$$

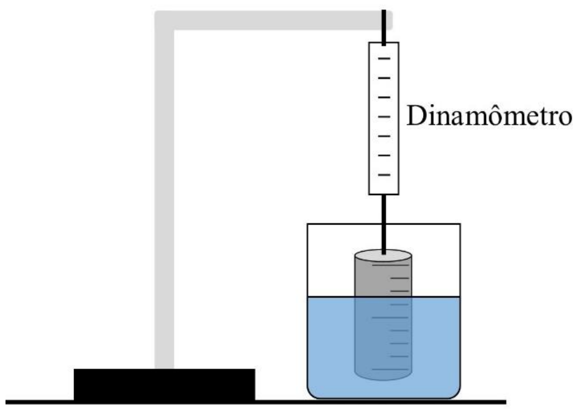

Figura 5.1: Representação da montagem experimental para a verificação do princípio de Arquimedes.

Nota-se pela Equação 3.2 que a força no dinamômetro é igual ao peso real do corpo menos o empuxo, por esse motivo, ele será chamado de peso aparente. Esse resultado explica o motivo dos corpos parecerem menos pesados quando estão submersos em água.

5.3 Material Utilizado

Paquímetro, béquer, dinamômetro, líquidos desconhecidos, haste com suporte, pincel e cilindro.

5.4 Procedimento Experimental

1. Meça o peso do cilindro e a área da sua base com suas respectivas incertezas.
2. Com o pincel, faça graduações ao longo do cilindro. Faça pelo menos oito marcas.
3. Pendure o cilindro no dinamômetro e mergulhe-o gradualmente no líquido. Para cada altura mergulhada, anote o valor P' e complete a Tabela 5.1. Coloque

também o erro associado a cada grandeza. Para encontrar o erro associado ao volume, utilize a teoria de propagação de erros.

Tabela 5.1: Valores medidos para o peso aparente, altura submersa e volume submerso do cilindro.

P' (N)	Altura (cm)	Volume (cm^3)
	0	0

4. Repita o procedimento descrito utilizando o segundo fluido.

5.5 Questionário

1. (Pré-relatório) Demostre a Equação 5.1 para um cilindro reto na vertical utilizando a equação que fornece a pressão em função da profundidade em um fluido. Para isso, considere a força que atua nas bases, superior e inferior do cilindro.
2. (Pré-relatório) Leia a sessão 14-5 da referência [12], ou outra de sua preferência, e mostre que a Equação 5.1 é geral.
3. (Pré-relatório) Mostre que, quando a densidade do corpo é menor do que a do fluido, o mesmo flutua.
4. (Pré-relatório) Demostre a Equação 5.2. Como será utilizado um cilindro no presente experimento, reescreva a Equação 5.2 em termos da área da base do cilindro e a altura submersa no fluido.
5. Com os valores presentes na Tabela 5.1, construa um gráfico de P' em função da altura submersa h ou de P' em função do volume submerso. Ajuste esses dados com a uma função matemática adequada e dos parâmetros fornecidos pelo programa, determine a densidade do fluido e o valor de P. Compare esses valores com o peso do cilindro e com a tabela abaixo e identifique o fluido utilizando no experimento.
6. Repita o procedimento com os valores obtidos para o segundo fluido.

Tabela 5.2: Densidade de alguns líquidos à 20 ºC [1].

Líquido	**Densidade (kg/m^3)**
Água	$1{,}00 \times 10^3$
Água do mar	$1{,}03 \times 10^3$
Benzeno	$0{,}90 \times 10^3$
Glicerina	$1{,}26 \times 10^3$
Etanol	$0{,}81 \times 10^3$

6 Capacidade Térmica de um Calorímetro e Calor Específico de Sólidos

6.1 Objetivo

Determinar a capacidade térmica de um calorímetro e o calor específico de alguns metais.

6.2 Fundamento Teórico

Diferente do seu sentido coloquial, o calor é uma energia trocada devido à existência de uma diferença de temperatura entre dois ou mais corpos. Na ausência de trabalho, em acordo com primeira lei da termodinâmica, o calor provoca uma variação na energia térmica dos corpos até que eles atinjam o equilíbrio térmico. A capacidade térmica de determinado corpo, comumente representado por C, é uma medida da quantidade de calor necessária para que a temperatura desse corpo varie em uma unidade, sendo definida por:

$$C = \frac{Q}{\Delta T}, \tag{6.1}$$

onde Q é o calor e ΔT a variação de temperatura.

A capacidade térmica depende do tipo de material é diretamente proporcional à quantidade de matéria de que ele possui. Dessa maneira, define-se a capacidade térmica, representada por c, como o calor específico por unidade de massa, logo:

$$c = \frac{C}{m} = \frac{Q}{m\Delta T}, \tag{6.2}$$

onde m é massa do material.

6.3 Material Utilizado

Calorímetro, termômetro, água, ebulidor, béquer, fogareiro, álcool em gel e seis cilindros metálicos.

6.4 Procedimento Experimental

1. Visando determinar a capacidade térmica do calorímetro, coloque aproximadamente 50 g de água em temperatura ambiente dentro calorímetro, agitar e esperar atingir o equilíbrio térmico. Em seguida, adicione aproximadamente 80 g de água a uma temperatura por volta de 60 ^{o}C, tampe o calorímetro. Essa água deverá ser aquecida com o auxílio do ebulidor e do fogareiro. Agite suavemente o recipiente e espere cerca de quatro minutos para que a temperatura se estabilize. Meça a temperatura de equilíbrio. Repita o procedimento também com 60 g de água ambiente e 90 g de água quente e 70 g de água ambiente e 80 g de água quente. Construa uma tabela com todas essas informações.
2. Meça a massa dos três cilindros mais leves simultaneamente. Para determinar o calor específico dos cilindros, aqueça-os até aproximadamente 100 ^{o}C (faça isso aquecendo a água com ebulidor, em seguida, coloque a mesma água sobre o fogareiro, em seguida, mergulhe os cilindros na água.). Aguarde um tempo para que os cilindro entrem em equilíbrio térmico com a água e anote sua temperatura. Adicione algo em torno de 100 g de água em temperatura ambiente no calorímetro. Meça a temperatura e em seguida coloque os três cilindros aquecidos também dentro do calorímetro. Meça a temperatura de equilíbrio. Repita o

procedimento descrito com o segundo cilindro. Construa uma tabela com todas essas informações.

6.5 Questionário

1. (Pré-relatório) Considerando o primeiro procedimento, mostre que:

$$C = \left|\frac{m_{aQ} \cdot c \cdot \left(T - T_Q\right) + m_{aA} \cdot c \cdot (T - T_A)}{T - T_A}\right|, \tag{6.3}$$

onde m_{aQ} e m_{aA} são as massas de água quente e a massa da água em temperatura ambiente, respectivamente, T_Q e T_A as temperaturas da água quente e a temperatura ambiente, respectivamente, T a temperatura de equilíbrio e c o calor específico da água (que deve ser consultado em alguma referência).

2. (Pré-relatório) Utilizando a teoria de propagação de erros, faça uma análise do erro referente ao cálculo da capacidade térmica acima descrita.
3. (Pré-relatório) Considerando o segundo procedimento, mostre que:

$$c_M = \left|\frac{m_a \cdot c \cdot (T - T_A) + C \cdot (T - T_A)}{m_M \cdot (T - T_M)}\right|, \tag{6.4}$$

   onde c_M é o calor especíco do metal, m_a e m_M as massas de água e do cilíndro metálico, T, T_A e T_M as temperaturas de equilíbrio, ambiente e inicial do metal, respectivamente.

4. (Pré-relatório) Faça uma análise do erro referente ao cálculo do calor específico acima descrito.
5. Com as informações obtidas pelo primeiro procedimento, encontra a capacidade térmica do calorímetro e sua respectiva incerteza.
6. Com as informações obtidas no procedimento dois e sabendo a capacidade térmica do calorímetro, obtido no item acima, determine o calor específico dos dois cilindros metálicos, assim como suas respectivas incertezas. Procure na literatura o calor específico de alguns metais e compare com o resultado obtido. Com essa informação, tente identificar qual a composição do cilindro.

7 Calor Específico da Água

7.1 Objetivo

Determinar o calor específico da água.

7.2 Fundamento Teórico

Calor é uma energia trocada devido à existência de uma diferença de temperatura entre dois ou mais corpos. Por definição, é comumente adotado que o calor é positivo quando o sistema recebe energia e negativo quando ele perde.

Assim como é feito nos chuveiros elétricos, pode-se fornecer calor utilizando-se uma resistência elétrica submetida à uma diferença de potencial, através do chamado efeito Joule. Dessas informações, tem-se que:

$$T(t) = \frac{Vi}{C} t + T_o, \tag{7.1}$$

onde $T(t)$ e T_o são as temperaturas em um tempo t e a temperatura inicial, respectivamente, V a diferença de potencial, i a corrente elétrica e C a capacidade térmica do sistema, calorímetro e água.

7.3 Material Utilizado

Fonte de tensão DC, cabos, dois multímetros, calorímetro (capacidade térmica informada pelo fabricante de 20 cal/^{o}C), balança, água e resistência elétrica.

7.4 Procedimento Experimental

1. Monte o circuito conforme ilustrado na Figura 7.1. Coloque aproximadamente 100 g de água dentro calorímetro. Meça a temperatura do sistema e observe se a resistência está submersa. Só ligue o sistema se a resistência estiver submersa, caso contrário, a mesma pode queimar.

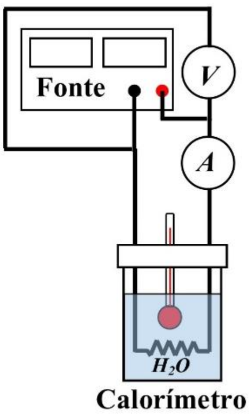

Figura 7.1: Montagem do experimento.

2. Ajuste a tensão na fonte em 12 V, ligue o circuito, acione o cronômetro e anote a corrente elétrica que passa pelo circuito. Para variações de temperatura de aproximadamente 2 ^{o}C, transcreva na Tabela 7.1 a temperatura do sistema e tempo gasto para atingir essa temperatura.

Tabela 7.1: Variação da temperatura em função do tempo.

T (ºC)										
t (s)	0									

7.5 Questionário

1. (Pré-relatório) Demonstre a Equação 7.1. Explique as aproximações consideradas para chegar nesse resultado.
2. Com os dados da Tabela 7.1, construa um gráfico da temperatura em função do tempo. Justificando a escolha, ajuste os dados com uma função matemática adequada.
3. Discuta a necessidade ou não de se considerar a capacidade térmica do calorímetro na Equação 7.1.
4. Partindo dos coeficientes obtidos do ajuste dos dados experimentais, determine o calor específico da água e a temperatura ambiente. Discuta o erro associado a esse resultado e o compare com valores obtidos na literatura e com a temperatura ambiente medida de forma direta. Não deixe de considerar as incertezas obtidas.

8 Lei de Newton para o Resfriamento

8.1 Objetivo

Determinar experimentalmente a lei de resfriamento de Newton.

8.2 Fundamento Teórico

Segundo a lei de Newton para o resfriamento, a taxa de variação de temperatura de determinando corpo é diretamente proporcional à diferença de temperatura entre corpo e o ambiente. Dessa maneira, tem-se que a temperatura do mesmo em função do tempo pode ser descrita pela expressão:

$$T(t) - T_a = (T_o - T_a)e^{-bt}, \quad (8.1)$$

onde T_a e T_o são as temperaturas ambiente e inicial do corpo e b é o coeficiente de transferência de energia térmica.

8.3 Material Utilizado

Ebulidor, béquer, termômetro e cronômetro.

8.4 Procedimento Experimental

1. Meça a temperatura ambiente.
2. Coloque água no béquer, aqueça a água até, aproximadamente, 90 ºC. Retire o ebulidor da água e aguarde até que a água atinja 85 ºC. Meça o tempo decorrido para variações de temperatura de 2 em 2 graus até 55 ºC. Anote os dados na Valores medidos para a temperatura da água e o logaritmo neperiano da diferença entre a mesma e a temperatura ambiente em função do tempo.

Tabela 8.1: Valores medidos para a temperatura da água e o logaritmo neperiano da diferença entre a mesma e a temperatura ambiente em função do tempo

t (s)	T (ºC)	$\ln(T-T_a)$
0		

8.5 Questionário

1. (Pré-relatório) Deduza a Equação 9.1.
2. (Pré-relatório) Discuta de quais grandezas físicas o coeficiente de transferência de energia térmica depende.
3. (Pré-relatório) Discuta a necessidade de se manter o termômetro em um posição fixa durante a realização do experimento.
4. Com os dados da Tabela 8.1, construa um gráfico de $T\ versus\ t$. Ajuste os dados com uma função matemática adequada e, dos parâmetros fornecidos pelo *software*, estime os valores do coeficiente de transferência de energia térmica e da temperatura ambiente, além de suas respectivas incertezas. Compare o valor obtido para T_a do ajuste com o valor medido diretamente com o termômetro.
5. Construa um gráfico de ln $(T - T_a)$ em função do tempo. Discuta esse processo de mudança de variável e suas vantagens. Ajuste os dados com um funça matemática que esteja em acordo com a teoria e, partindo dos parâmetros obtidos desse ajuste, determine o coeficiente de transferência de energia térmica e a diferença entre a temperatura inicial da água e a temperatura ambiente, além de suas incertezas. Compare esses valores com os obtidos no item anterior.

9 Lei de Boyle

9.1 Objetivo

Analisar a validade da lei de Boyle (relação entre pressão e volume de um gás em um processo isotérmico), determinar a pressão atmosférica local e o volume inicial do gás.

9.2 Fundamento Teórico

Um gás ideal ou gás perfeito é um modelo formado por um número elevado de átomos ou moléculas em constante movimento e que se interagem somente em colisões completamente elásticas. A maioria dos gases reais em condições normais de temperatura e pressão, têm seu comportamento bem aproximado de um gás ideal, de forma que, quanto menor a pressão e quanto mais distante for sua temperatura do ponto de liquefação do gás, melhor é essa aproximação [13].

Em 1662, o físico Robert Boyle apresentou uma lei empírica relacionando a pressão e o volume do ar em um processo isotérmico, a chamada lei de Boyle. Os experimentos de Boyle revelaram que a pressão e o volume nesse tipo de transformação são inversamente proporcionais, logo:

$$P = \frac{k}{V}, \tag{9.1}$$

onde P é a pressão, V o volume e k uma constante que depende da temperatura e da quantidade de gás. Considerando as condições iniciais do gás (onde P_o e V_o são a pressão e o volume iniciais, respectivamente), pode-se escrever que:

$$PV = P_o V_o. \tag{9.2}$$

É muito comum utilizar manômetro para realizar medidas de pressão. Esses instrumentos utilizam a pressão atmosférica P_o como referência, de forma que a pressão informada no equipamento, aqui denominada ΔP, é dada ela diferença entre a pressão absoluta P e a pressão atmosférica P_o. Por esse motivo, é frequentemente interessante reescrever a lei de Boyle em termos das diferenças de pressão e de volume ΔV. Dessa maneira, manipulando a Equação 9.2, mostra-se que [14]:

$$\frac{1}{\Delta P} = -\frac{V_o}{P_0}\frac{1}{\Delta V} - \frac{1}{P_o}. \tag{9.3}$$

9.3 Material Utilizado

Conjunto Malgaresi com manômetro com manômetro da marca Fulgare. Esse aparelho, apresentado na Figura 9.1, é composto por uma seringa com escala conectada a um manômetro por mangueiras plástica e uma válvula, indicada na figura, que controla a entrada/saída e a passagem de ar pelo equipamento. **A seringa é de vidro, logo, tome cuidado.**

9.4 Procedimento Experimental

1. Faça uma análise cuidadosa do funcionamento da válvula.
2. Com a válvula aberta, puxe o êmbolo da seringa até que aproximadamente 20 ml de gás fiquem contidos nela. Feito isso, feche a válvula permitindo que o ar circule entre a seringa e o manômetro. Pressione o êmbolo girando o manípulo até que o volume da seringa seja de aproximadamente 8 ml. Aguarde aproximadamente 1 minuto para o sistema estabilizar. Caso a pressão não se mantenha fixa, informe

seu professor. É provável que a vedação do sistema não esteja boa o suficiente para a realização do experimento.

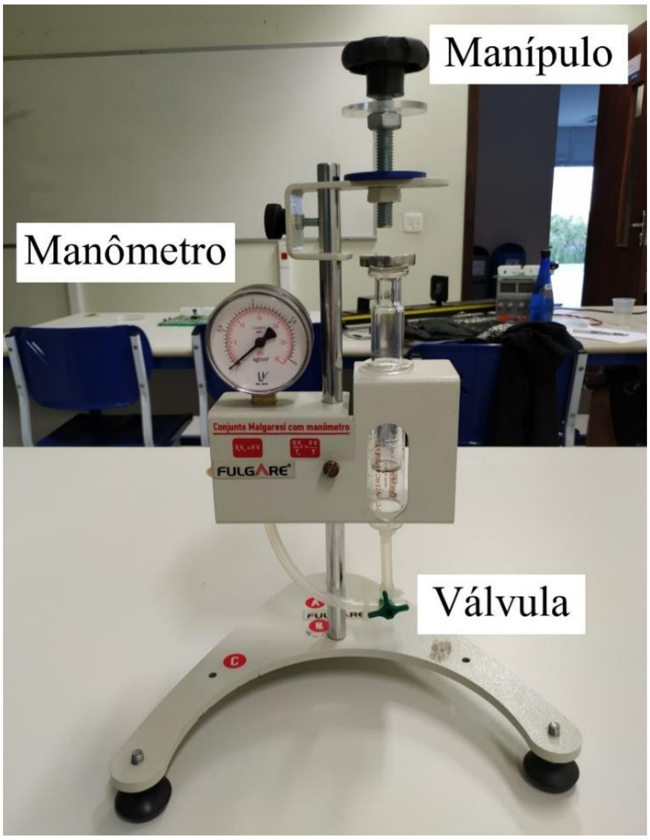

Figura 9.1: Conjunto Malgaresi com manômetro da marca Fulgare.

3. Gire o manípulo deixando o gás se expandir e, consequentemente, a pressão diminuir. Varia o volume de 1 em 1 ml e anote o valor informado no manômetro. Complete as duas primeiras e a última coluna da Tabela 9.1.

Tabela 9.1: Valores medidos para o volume e variação de pressão e obtidos para a variação no volume, inverso da variação no volume e inverso da pressão.

V (ml)	ΔP (kgf/cm^2)	ΔV (ml)	$1/\Delta V$ (ml^{-1})	$1/\Delta P$ (cm^2/kgf)

4. Deixe o gás expandir totalmente, girando o manípulo até que o parafuso perca o contato com a seringa, e anote o volume medido. Esse valor é o volume inicial de gás. Complete a terceira e quarta coluna da Tabela 1.

9.5 Questionário

1. (Pré-relatório) Partindo da Equação 9.2 chegue na Equação 9.3
2. Informe as incertezas de ΔP e ΔV.
3. Utilizando o método de propagação de incertezas e as incertezas experimentais, determine as incertezas de $1/\Delta P$ e $1/\Delta V$.
4. Com os valores da Tabela 9.1, construa um gráfico de $1/\Delta P$ em função de $1/\Delta V$. Explique qual o comportamento esperado da relação entre essas duas grandezas. Ajuste os dados com a função matemática adequada.
5. Dos coeficientes encontrados a partir do ajuste dos dados experimentais, estime o valor da pressão atmosférica local e sua respectiva incerteza e compare com valores encontrados em sites de previsão do tempo. Estime também a quantidade de gás dentro do sistema e sua respectiva incerteza. Comente se esse valor está dentro do esperado.

10 Referências

[1] H. D. Young e R. A. Freedman, Física II, Sears e Zemansky: Termodinâmica e Ondas, São Paulo: Pearson Education, 2015.

[2] E. E. Rodríguez e G. A. Gesnouin, “Effective Mass of an Oscillating Spring,” *The Physics Teacher,* vol. 45, pp. 100-103, 2007.

[3] E. E. Galloni e M. Kohen, “Influence of the mass of the spring on its static and dynamic effects,” *American Journal of Physics,* vol. 47, nº 12, pp. 1076-1078, 1979.

[4] N. Ferraro, F. R. Jr e P. Soares, Os Fundamentos da Física, Volume 2, Termologia, Óptica e Ondas, 9 ed., Editora Moderna, 2007.

[5] W. Bussab e P. Morettin, Estatística Básica, 8 ed., Saraiva, 2013.

[6] H. D. Young e R. A. Freedman, Física IV, Sears e Zemansky: Ótica e Física Moderna, 14 ed., São Paulo: Pearson Education, 2016.

[7] D. Halliday, R. Resnick e J. W. , Fundamentos de física, volume 4 : Óptica e Física Moderna, 10 ed., Rio de Janeiro: LTC, 2016.

[8] “Manual de Instruções e Guia de Experimentos, Banco Ótico Alfa AZEHEB, REV. 11- 16/10/2018.”.

[9] E. Hecht, Optics, 5 ed., Pearson, 2016..

[10] S. C. Zilio, “Desenho e Fabricação Óptica,” [Online]. Available: http://www.fotonica.ifsc.usp.br/ebook/book2/Desenho-Fabricacao-Otica.pdf.

[11] J. Emery, “Optics,” [Online]. Available: http://www.stem2.org/je/optics.pdf.

[12] D. Halliday, R. Resnick e J. Walker, Fundamentos de física, volume 2 : gravitação, ondas e termodinâmica, 10 ed., Rio de Janeiro: LTC, 2016.

[13] H. M. Nussenzveig, Curso de Fisica Básica 2: Fluidos, Oscilações e Ondas, Calor, 4 ed., São Paulo: Edgar Blücher, 2002.

[14] L. Vertchenko e A. G. Dickman, “Verificando a lei de Boyle em um laboratório didático usando grandezas estritamente mensuráveis,” *Revista Brasileira de Ensino de Física,* vol. 34, pp. 1-5, 2012.

A. Medidas e Erros

Média aritmética:

$$\bar{M} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} M_i. \tag{A.1}$$

Desvio padrão da média:

$$\sigma = \left[\frac{1}{n(n-1)}\sum_{i=1}^{n}(M_i - \bar{M})^2\right]^{1/2}. \tag{A.2}$$

Método da derivada para o cálculo de incertezas:

$$\Delta f(x_1, x_2, \dots, x_n) = \left[\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)^2 \Delta x_i^2\right]^{1/2}. \tag{5}$$

B. Orientações Gerais para a Confecção dos Relatórios

1. Deverá ser feito um relatório por grupo.
2. O relatório deverá ser feito com fonte Times New Roman ou Arial tamanho 12 com. O texto deve estar justificado (distribuído uniformemente entre as margens). Tenham bom senso com as demais diagramações.
3. O pré-relatório deve ser apresentado antes de cada prática. Caso isso não ocorra, o grupo não poderá realizar a prática.
4. Somente alunos que participarem da aula terão nota no relatório.
5. Nenhuma parte do relatório pode ser plagiada, logo, não pode ser copiada de qualquer fonte.
6. O relatório deve ser entregue impresso.
7. O relatório consiste basicamente de duas partes, sendo elas:

1ª Parte (Pré-relatório)

- Capa
  Instituição
  Título da prática
  Integrantes do grupo
  Professor
  Data
- Objetivo
- Fundamento teórico – Explique os conceitos teóricos de forma clara e suscinta que servirão de base para a análise e entendimento da prática. No último parágrafo, apresente um breve resumo do que será feito no experimento.

Todas as questões referentes ao pré-relatório apresentadas na seção Questionário dos roteiros, devem ser respondidas e/ou discutidas no fundamente teórico na forma dissertativa (não como pergunta e resposta).

2ª Parte

- Material utilizado – Liste todo o equipamento utilizando. Informe sua precisão e/ou incerteza.
- Procedimentos – Faça um relato detalhado de todos os procedimentos realizados durante a execução do experimento.
- Resultados e análise de dados – Apresente os resultados obtidos e suas respectivas incertezas na forma de texto, tabelas e/ou gráficos. Lembre-se de comentar sobre cada um deles. Faça uma análise detalhada dos dados seguindo o que é sugerido na seção Questionário de cada roteiro. Possíveis erros e limitações práticas também devem ser discutidas.
- Conclusão – Deve ser baseada nos objetivos. Apresente um breve resumo do que foi feito na prática. Discuta se os resultados obtidos estão de acordo com o esperado e se apresentam boa qualidade com relação aos erros experimentais. Caso os objetivos não tenham sido alcançados, tente justificar o motivo desse ocorrido.
- Referências – Além dessa apostila, deve-se utilizar no mínimo mais uma referência.

8. A primeira parte deverá ser apresentada antes da realização da prática. O relatório completo, junção das duas partes, deverá ser entregue na aula posterior à realização da prática.
9. Todas as figuras devem estar centralizadas no texto, enumeradas na parte inferior e conter legendas.
10. Todas as tabelas devem estar centralizadas no texto, enumeradas na parte superior e conter legendas.
11. Todas as equações devem ser enumeradas à direita.