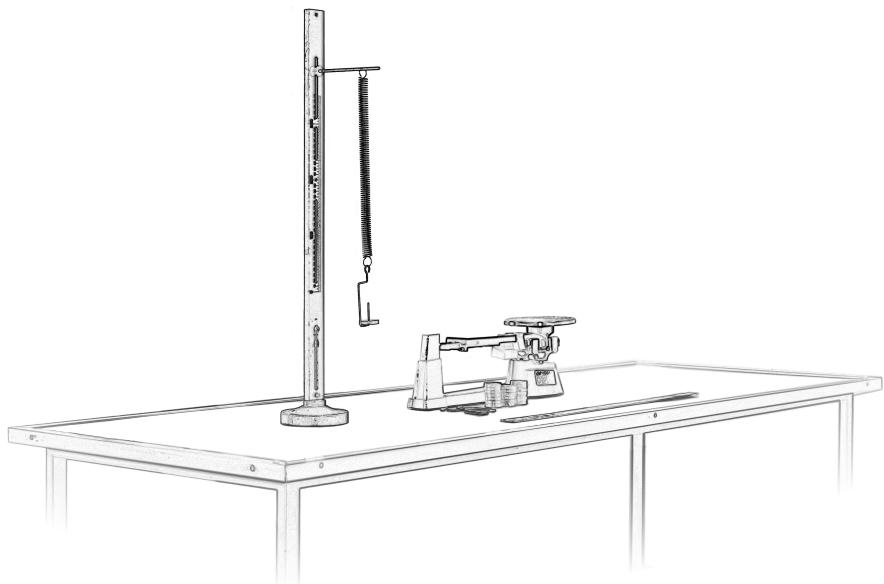


Clebson Abati Graeff

*Notas de aula:
Laboratórios de Física 1, 2, e 3.*



UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
CÂMPUS PATO BRANCO



Este trabalho é licenciado de acordo com a Licença Creative Commons Atribuição-NãoComercial-CompartilhIgual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0)¹. De acordo com essa licença você pode utilizar/compartilhar/adaptar este material desde que respeite as seguintes condições

❶ Você deve dar os créditos apropriados ao autor, prover um link para a licença e indicar se mudanças foram efetuadas. Você pode fazê-lo de qualquer maneira razoável, porém não de forma a sugerir que o autor endossa seu trabalho.

❷ Você não pode usar o material para fins comerciais.

❸ Se você remixar, transformar, ou criar a partir do material, tem de distribuir as suas contribuições sob a mesma licença que o original.

Você não pode aplicar termos jurídicos ou medidas de caráter tecnológico que restrinjam legalmente outros de fazerem algo que a licença permita.

¹ http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.pt_BR

Clebson Abati Graeff
cgraeff@utfpr.edu.br

CRONOGRAMA

As aulas seguirão o planejamento abaixo. No calendário ao lado, estão circuladas as datas das provas.

LABORATÓRIO DE FÍSICA 3 - FI23NB-3EXTA (AULAS NAS TERÇAS 8:20 – 10:00)

Aula	Data	Conteúdo
1	05/03	Apresentação da disciplina.
2	12/03	Exp. 1, Introdução ao eletromagnetismo.
3	19/03	—
4	26/03	Exp. 2, Superfícies equipotenciais.
5	02/04	—
6	09/04	Exp. 3, Capacitores de placas paralelas.
7	16/04	—
8	23/04	Exp. 4, Lei de Ohm.
9	30/04	—
10	07/05	Exp. 5, Circuito RC.
11	14/05	—
12	21/05	Exp. 6, Campo magnético terrestre.
13	28/05	—
14	04/06	Aula para dúvidas.
15	11/06	Prova de laboratório.
16	18/06	Entrega das notas da prova de laboratório.
17	25/06	2ª chamada de experimentos.
18	02/07	Entrega das notas finais da disciplina.

Março						
S	T	Q	Q	S	S	D
				1	2	3
4	(5)	6	7	8	9	10
11	(12)	13	14	15	16	17
18	19	20	21	22	23	24
25	(26)	27	28	29	30	31

Abril						
S	T	Q	Q	S	S	D
1	2	3	4	5	6	7
8	(9)	10	11	12	13	14
15	16	17	18	19	20	21
22	(23)	24	25	26	27	28
29	30					

Maio						
S	T	Q	Q	S	S	D
				1	2	3
6	(7)	8	9	10	11	12
13	14	15	16	17	18	19
20	(21)	22	23	24	25	26
27	28	29	30	31		

Junho						
S	T	Q	Q	S	S	D
				1	2	
3	(4)	5	6	7	8	9
10	(11)	12	13	14	15	16
17	(18)	19	20	21	22	23
24	(25)	26	27	28	29	30

Julho						
S	T	Q	Q	S	S	D
1	(2)	3	4	5	6	7
8	9	10	11	12	13	14
15	16	17	18	19	20	21
22	23	24	25	26	27	28
29	30	31				

Março						
S	T	Q	Q	S	S	D
				1	2	3
4	5	6	7	8	9	10
11	12	13	14	15	16	17
18	19	20	21	22	23	24
25	26	27	28	29	30	31

Abril						
S	T	Q	Q	S	S	D
1	2	3	4	5	6	7
8	9	10	11	12	13	14
15	16	17	18	19	20	21
22	23	24	25	26	27	28
29	30					

Maio						
S	T	Q	Q	S	S	D
				1	2	3
6	7	8	9	10	11	12
13	14	15	16	17	18	19
20	21	22	23	24	25	26
27	28	29	30	31		

Junho						
S	T	Q	Q	S	S	D
				1	2	
3	4	5	6	7	8	9
10	11	12	13	14	15	16
17	18	19	20	21	22	23
24	25	26	27	28	29	30

Julho						
S	T	Q	Q	S	S	D
1	2	3	4	5	6	7
8	9	10	11	12	13	14
15	16	17	18	19	20	21
22	23	24	25	26	27	28
29	30	31				

LABORATÓRIO DE FÍSICA 3 - FI23NB-2EXTA (AULAS NAS SEXTAS 10:20 – 12:00)

Aula	Data	Conteúdo
1	08/03	Apresentação da disciplina.
2	15/03	Exp. 1, Introdução ao eletromagnetismo.
3	22/03	—
4	05/04	Exp. 2, Superfícies equipotenciais.
5	12/04	—
6	19/04	Exp. 3, Capacitores de placas paralelas.
7	26/04	—
8	03/05	Exp. 4, Lei de Ohm.
9	10/05	—
10	17/05	Exp. 5, Circuito RC.
11	24/05	—
12	07/06	Exp. 6, Campo magnético terrestre.
13	14/06	—
14	21/06	Prova de laboratório.
15	28/06	Entrega das notas da prova de laboratório.
16	05/07	Entrega das notas finais da disciplina.

Sumário

I Medidas, Técnicas de Análise de Dados

1	<i>Medidas</i>	13
1.1	<i>Medição, tipos de medidas</i>	13
1.2	<i>Tipos de equipamentos, algarismos significativos</i>	14
1.2.1	<i>Medidas realizadas com equipamentos analógicos</i>	14
1.2.2	<i>Medidas realizadas com equipamentos não-analógicos</i>	16
1.2.3	<i>Unidades e algarismos significativos, notação científica</i>	19
1.2.4	<i>Operações envolvendo medidas</i>	20
1.2.5	<i>Arredondamento</i>	22
2	<i>Gráficos</i>	25
2.1	<i>Gráficos</i>	25
2.2	<i>Gráficos de dispersão</i>	27
2.2.1	<i>Principais elementos de um gráfico de dispersão</i>	28
2.2.2	<i>Problemas mais comuns em gráficos de dispersão</i>	30
2.2.3	<i>Elaborando um gráfico com papel milimetrado</i>	32
3	<i>Erros</i>	35
3.1	<i>Erros de medidas</i>	35
3.2	<i>Medidas e erros</i>	35
3.2.1	<i>Tipos de erros</i>	36
3.3	<i>Erros de escala em uma medida direta</i>	38
3.4	<i>Erros propagados</i>	39
3.4.1	<i>Constantes e erros propagados</i>	42
3.5	<i>Erros e algarismos significativos</i>	42

3.6	<i>Incerteza fracional e percentual</i>	43
3.6.1	<i>Erro percentual em relação a um valor de referência</i>	44
3.7	<i>Expressão geral para o cálculo do erro propagado</i>	45
4	<i>Regressão Linear</i>	47
4.1	<i>Linhas de Tendência</i>	47
4.2	<i>Regressão Linear</i>	49
4.2.1	<i>Regressão linear utilizando uma calculadora</i>	54
4.2.2	<i>Interpretação dos coeficientes</i>	56
4.3	<i>Linearização</i>	58
4.4	<i>Linearização e teste de hipóteses</i>	58
4.5	<i>Erros nos parâmetros de uma regressão linear</i>	60
5	<i>Desvio padrão</i>	65
5.1	<i>Histogramas</i>	65
5.2	<i>Desvio padrão</i>	65

II Experimentos

6	<i>Medidas</i>	71
7	<i>Movimento retilíneo uniforme (MRU) e uniformemente variado (MRUV)</i>	81
8	<i>Lei de Hooke</i>	95
9	<i>Leis de Newton</i>	103
10	<i>Arrasto</i>	111
11	<i>Atrito</i>	117
12	<i>Energia Mecânica</i>	129
13	<i>Elasticidade</i>	139
14	<i>Empuxo</i>	145
15	<i>Oscilações</i>	151
16	<i>Ondas estacionárias</i>	163
17	<i>Dilatação linear e lei de resfriamento de Newton</i>	175
18	<i>Calor Específico de Sólidos</i>	185
19	<i>Zero absoluto</i>	197
20	<i>Eletromagnetismo e medidas elétricas</i>	207

21	<i>Superfícies Equipotenciais</i>	219
22	<i>Capacitores de placas paralelas</i>	227
23	<i>Lei de Ohm</i>	233
24	<i>Círculo RC</i>	241
25	<i>Campo magnético terrestre</i>	249

Introdução

Este livro/apostila tem como objetivo facilitar o desenvolvimento das atividades de laboratório. Para isso, todo o conteúdo de análise de dados e os próprios experimentos foram reunidos em um conjunto único.

Na primeira parte, as técnicas de análise de dados são introduzidas e discutidas. Nenhuma técnica muito avançada é apresentada, somente o básico, já que o texto é de nível introdutório. Os assuntos cobertos são medidas, erros, erros propagados, gráficos, regressão linear, e um pouco sobre desvio padrão e erros aleatórios.

Na segunda, os experimentos são analisados de um ponto de vista teórico, seguidos dos procedimentos para coleta de dados. Após isso, as equipes de alunos devem responder um questionário. Os experimentos utilizam diferentes técnicas de análise de dados, sendo que à medida que o semestre avança, o número e a complexidade das técnicas envolvidas aumenta. Isso não é completamente linear, no entanto, já que algumas experiências são mais complexas e mais ricas que outras de um ponto de vista de análise dos dados.

Fiz um esforço grande visando obter um texto de fácil compreensão e bem ilustrado, mas sempre restam pontos que podem ficar confusos — ou posso ter cometido um erro! —. Se isso acontecer, entre em contato comigo. Sugestões são sempre bem vindas.

Clebson Abati Graeff,
Pato Branco, fevereiro de 2024.

PARTE I: MEDIDAS, TÉCNICAS DE ANÁLISE DE DADOS

1 Medidas

Um dos principais objetivos da Física como ciência é determinar o resultado de experimentos não apenas qualitativamente, mas também quantitativamente. A realização de medidas está diretamente ligada a tal objetivo: para que possamos prever um resultado, precisamos de medidas de parâmetros relevantes do sistema e que servem de base para a previsão de novos valores através de um modelo matemático. Os valores previstos pelo modelo devem ser comparados com resultados experimentais, que — mais uma vez — devem ser medidos. Se as previsões concordarem com os resultados experimentais, o modelo deve ser submetido a mais testes; caso o modelo falhe, ele deve ser revisto.

O ato de realizar uma medição pode ser simples ou complexo, dependendo do tipo de medida a se realizar. Além disso, os valores obtidos estarão sempre sujeitos a erros que podem deturpar-lhos. Veremos abaixo alguns aspectos importantes para a determinação precisa de medidas.

1.1 *Medição, tipos de medidas*

O processo de obtenção do valor de uma medida é denominado *medição*. Tal processo consiste em comparar aquilo que se deseja medir com um padrão, obtendo o que se denomina como *medida direta*, ou no cálculo de um valor a partir de um conjunto de medidas diretas, o que se denomina como *medida indireta*.

Como exemplo de medida direta, podemos citar a determinação do comprimento de um objeto. Para obter o valor da medida, basta alinhar uma de suas extremidades ao zero de uma régua e verificarmos quantas marcas estão compreendidas no comprimento total do objeto. Temos, portanto, uma medida obtida através de uma comparação direta com um padrão de grandeza.

Algumas medidas, no entanto, não podem ser feitas de maneira direta — ou podem ser determinadas de maneira mais conveniente de forma indireta —. Se necessitamos saber a área de uma folha retangular, basta verificar as medidas laterais e então multiplicá-las. Desta forma, estamos determinando a área de uma maneira **indireta**. Da mesma maneira, o volume de um paralelepípedo pode ser determinado de maneira indireta através do produto de suas três dimensões. Para um sólido irregular, no entanto, é mais conveniente mergulhá-lo em um líquido e verificar através de uma escala graduada impressa no recipiente que o comporta qual é o volume deslocado. Portanto, uma grandeza qualquer pode ser determinada de maneira direta ou indireta, sendo que a escolha de um ou outro tipo de método é uma questão de conveniência.

1.2 Tipos de equipamentos, algarismos significativos

¹ Em equipamentos digitais que verificam o valor de uma quantidade que costuma sofrer pequenas variações em torno de um valor, os aparelhos geralmente realizam uma série de medidas durante um certo intervalo de tempo e mostram somente o valor médio de tais medidas. Um exemplo disso são os velocímetros digitais: devido a pequenas variações de velocidade que ocorrem durante a condução, o processo descrito acima deve ser realizado visando mostrar um número que sofra variações menos frequentes, distraindo menos o condutor.



Figura 1.1: Exemplo de equipamento analógico: régua.

Os equipamentos de medida podem ser divididos em dois tipos:

Analógicos Os equipamentos analógicos são aqueles que permitem que realizemos uma estimativa de valores entre duas marcas quaisquer de sua escala. São exemplos deste tipo de equipamento régua, velocímetros de ponteiro, relógios de ponteiros, etc.

Não-analógicos Equipamentos que não permitem a estimativa de valores são classificados como não-analógicos: nessa categoria se incluem os equipamentos digitais e aqueles dotados de escalas auxiliares. Nos equipamentos digitais, os dados da medida são mostrados através de um visor digital que permite a leitura direta dos valores numéricos¹. Já os equipamentos dotados de escala auxiliar — também conhecida como nônio ou vernier — possibilitam a leitura em uma escala analógica principal, porém com a leitura da subdivisão da escala principal na escala auxiliar. Como a escala auxiliar tem divisões muito “finas”, no entanto, não é possível estimar dígitos menores do que a menor divisão da escala auxiliar.

Vamos tratar as medidas realizadas por cada tipo de equipamento separadamente nas seções seguintes. Trataremos também a questão de *algarismos significativos* de uma medida.

Figura 1.2: Equipamentos eletrônicos geralmente utilizam um visor digital para expressar os valores medidos. Na figura, uma balança digital.

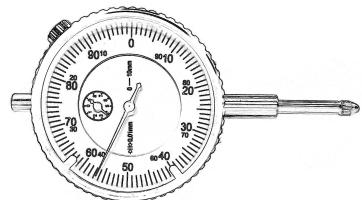
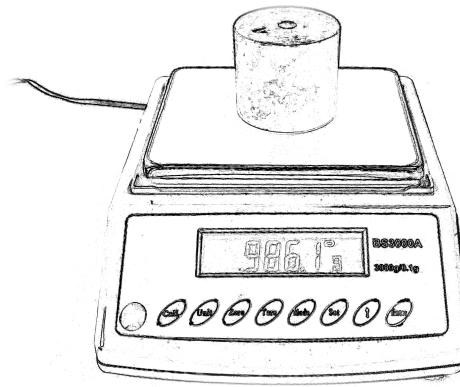


Figura 1.3: Equipamentos com ponteiros são exemplos comuns de equipamentos analógicos. Na figura temos um dilatômetro, equipamento utilizado para verificar pequenas variações de tamanho características de dilatação térmica (uma volta completa representa uma variação de 1,0mm).

1.2.1 Medidas realizadas com equipamentos analógicos

Suponhamos que precisamos usar uma trena para realizar uma medida de um muro. O equipamento em questão foi elaborado de tal forma que um metro está subdividido em 10 partes. Alinhamos uma extremidade da trena — aquela que contém o zero — com uma extremidade do muro e verificamos a outra extremidade. Vemos que o muro passa da marca dos 15 metros por três subdivisões, mas não passa da quarta subdivisão. O valor da medida do comprimento ℓ do muro está em algum ponto entre os valores correspondentes às duas marcas:

$$15,3 \text{ m} < \ell < 15,4 \text{ m}. \quad (1.1)$$

Sabemos que o muro termina em algum lugar entre a terceira e a quarta marca, sendo então maior que 15,3 m. Nesse caso, devemos estimar mais um algarismo. Se, por exemplo, a extremidade do muro está próxima da metade da distância entre as duas marcas da trena, porém antes dela, poderíamos estimar um valor 4 (isto é, quatro décimos da distância entre as duas subdivisões). Assim, podemos expressar a medida como,

$$\ell = 15,34 \text{ m.} \quad (1.2)$$

Poderíamos realizar uma estimativa com mais casas após o 4, mas a validade dela seria duvidosa: se já não temos certeza sobre a medida ser 4 (poderia ser 3 ou 5, em escalas menores é difícil efetuar uma estimativa), não temos ganho algum em denotar mais algarismos após o 4. Ao conjunto de algarismos que temos certeza (pois foram verificados no instrumento) e ao algarismo estimado, damos o nome de *algarismos significativos*. O último algarismo também é conhecido como *algarismo duvidoso*, pois seu valor pode mudar ao se utilizar um equipamento de medida mais preciso.

Em casos onde realizamos uma medida que coincide exatamente com uma marca, devemos considerar que o equipamento permitiria expressar divisões menores, se fosse o caso. Se, por exemplo, ao medirmos o muro com a trena mencionada a extremidade coincidir com a marca de 15 m, devemos expressar a medida como

$$\ell = 15,00 \text{ m,} \quad (1.3)$$

pois sabemos que não foi ultrapassada nenhuma subdivisão de décimos de metro, e determinamos que o algarismo estimado também é zero (pois se aparentemente coincide com a marca, não a ultrapassa em quantidade apreciável).

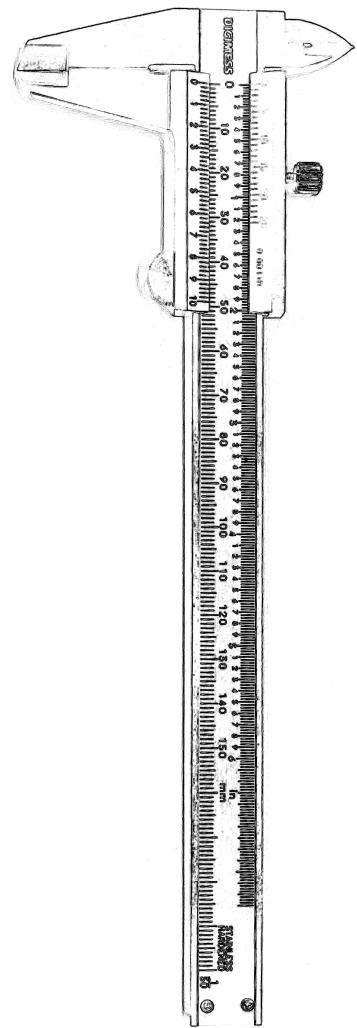


Figura 1.4: O paquímetro é um exemplo de equipamento *não-analógico*, pois é dotado de escala auxiliar (nônio).

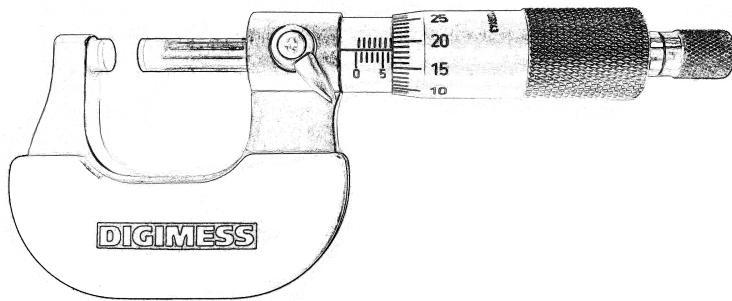


Figura 1.5: Um micrômetro pode ter ou não uma escala auxiliar: na figura, temos um exemplo em que não há escala auxiliar e por isso permite que um dígito seja estimado nas leituras.

1.2.2 Medidas realizadas com equipamentos não-analógicos

No caso de equipamentos não-analógicos, podemos subdividi-los em equipamentos digitais e em equipamentos dotados de escalas auxiliares. No caso do primeiro, a medida consiste em ler os números mostrados através de um visor. Todos os algarismos mostrados são significativos — exceto aqueles que simplesmente posicionam a vírgula, veja a seção seguinte —. Nesse caso, o último é o algarismo duvidoso, pois, novamente, seu valor poderia ser diferente se utilizássemos um equipamento mais preciso para realizar a medida.

No caso de equipamentos dotados de escalas auxiliares, apesar de não realizarmos a leitura de um visor digital, também não realizamos estimativas. Nesse caso realizamos a leitura a partir da escala auxiliar e, devido à precisão de tal escala, não conseguimos realizar estimativas. Novamente, todos os algarismos lidos são significativos², sendo que o último é denominado duvidoso devido ao fato de que pode mudar ao se utilizar um equipamento mais preciso.

Funcionamento da escala auxiliar

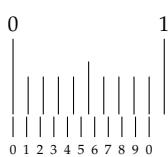


Figura 1.6: Escala de um equipamento dotado de escala auxiliar. A escala superior é a principal, enquanto a inferior é a auxiliar.

Em um equipamento dotado de uma escala auxiliar — como um paquímetro, por exemplo —, as medidas devem ser feitas utilizando-se a posição do zero da escala auxiliar na escala principal. Na Figura (1.6) vemos uma representação das escalas de leitura típicas de um equipamento dotado de escala auxiliar: a escala maior, superior, é a principal, enquanto a menor, inferior, é a auxiliar.

A ideia por trás da escala auxiliar é bastante simples: tomamos a menor divisão da escala principal, a subdividimos em n partes. Fazemos então uma escala auxiliar onde a menor divisão é a largura de $n - 1$ partes. Assim se a marca do zero da escala auxiliar estiver deslocado para a direita de uma marca i qualquer da escala principal pela largura da n -ésima parte, a marca imediatamente à direita do zero da escala auxiliar estará alinhado com a marca imediatamente à direita da i -ésima. Se a marca do zero estiver deslocada por duas vezes a largura da n -ésima parte, a segunda marca à direita do zero se alinhará à segunda marca à direita da i -ésima marca, e assim por diante. Dessa forma, podemos realizar uma leitura em que a menor divisão da escala é a largura da n -ésima parte.

Nas Figuras 1.7 e 1.8 temos dois deslocamentos diferentes para a escala auxiliar da Figura 1.6. A escala auxiliar de tais figuras foi construída de forma que a menor divisão da escala principal foi subdividida em 10 partes. Tomando 9 partes, construímos a menor divisão da escala auxiliar. Assim, se o zero da escala auxiliar for deslocado — em relação ao zero da escala principal — para a direita por uma distância equivalente a um décimo da largura da menor divisão da escala principal, temos que a marca à direita do zero da escala auxiliar se alinhará à marca à direita do zero da escala principal (situação da Figura 1.7). Na Figura 1.8 o zero da escala auxiliar está deslocado em seis partes para a direita, o que leva ao alinhamento da marca número 6 da escala auxiliar com a sexta marca à direita do

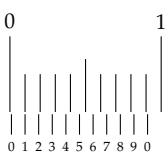


Figura 1.7: Escala auxiliar deslocada para a direita por um décimo da largura da menor divisão da escala principal. Note que a marca número 1 da escala auxiliar está alinhada com a primeira marca à direita do zero da escala principal.

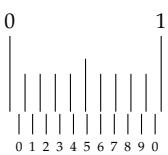


Figura 1.8: Escala auxiliar deslocada por 6 décimos da largura da menor divisão da escala superior. Note o alinhamento da marca número 6.

zero da escala principal.

Tomando medidas utilizando a escala auxiliar

A Figura 1.9 retrata uma medida tomada com um paquímetro cuja menor divisão da escala principal é de um milímetro e no qual a menor divisão da escala auxiliar é de $9/10$ da largura da menor divisão da escala principal. Para tomar a medida, fazemos o seguinte:

1. Efetuamos a leitura na escala principal através do zero da escala auxiliar. Consideramos a marcação imediatamente à esquerda do zero da escala auxiliar. Nesse caso temos 35 mm.
2. Verificamos qual é a marca da escala auxiliar que tem o melhor alinhamento com uma marca da escala principal. Nesse caso, temos que tal marca é a de número 6.
3. Como dividimos a menor divisão da escala principal em 10 partes para elaborar a escala auxiliar, ao alinharmos a sexta marca da escala auxiliar, temos $6/10$ de um milímetro, ou seja, 0,6 mm.
4. Somando essas duas contribuições, temos que a medida é 35,6 mm.

Veja que na prática basta *ler a escala principal através do zero da escala auxiliar, inserir uma vírgula, e anotar o número da marca na escala auxiliar que está alinhada à marca da escala principal*. Note ainda que o zero da direita na escala auxiliar serve para ajudar a verificar o alinhamento do zero da esquerda, pois ambos ficam alinhados ao mesmo tempo.

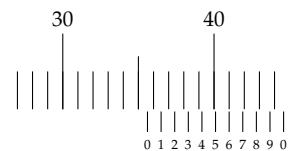
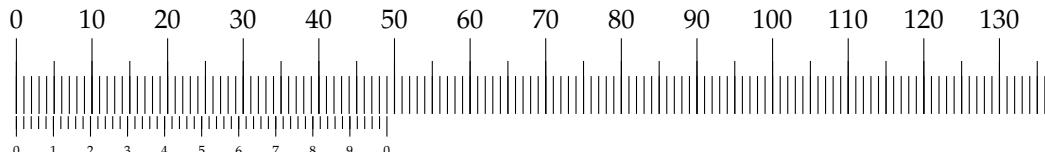


Figura 1.9: Exemplo de medida em um equipamento dotado de escala auxiliar.



Paquímetro com divisão de 1 mm em 50 partes

Na Figura 1.10, temos a representação das escalas de um paquímetro no qual a menor divisão da escala principal foi subdividida em 50 partes para elaborar a escala auxiliar. Portanto, verificamos que a menor divisão da escala é de $0,02\text{ mm}$ ($1/50$ de um milímetro). Se tivermos uma leitura como a da Figura 1.12 em um instrumento desse tipo, procedemos a leitura através das seguintes etapas:

1. Verificamos qual a leitura na escala principal da marca imediatamente à esquerda da marca do zero da escala auxiliar. Nesse caso temos 47 mm.
2. Na escala auxiliar, procuramos a marca que está mais bem alinhada com alguma das marcas da escala principal. Em muitos casos, ficamos em dúvida sobre qual é a marca mais bem alinhada, como duas ou três candidatas. No caso de termos três, escolha a central.

Figura 1.10: Escalas de um paquímetro milimetrado em que a menor divisão da escala principal é subdividida em 50 partes para elaborar a escala auxiliar.

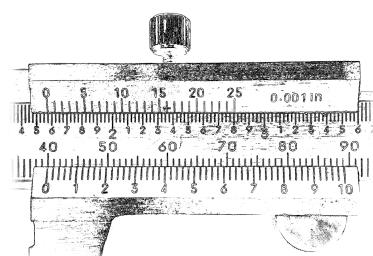


Figura 1.11: Detalhe mostrando a escala auxiliar de um paquímetro em que 1,0 mm é dividido em 50 partes.

No caso em questão, vemos que a primeira, a segunda e a terceira marcas à direita da marca 2 da escala auxiliar estão bem alinhadas. Escolhendo a central, temos $12 \times 0,02 \text{ mm} = 0,24 \text{ mm}$.

3. A medida será composta pela soma dos dois resultados, isto é, 47,24 mm.

Na prática, a leitura é bastante simples:

1. Determinamos a leitura da escala principal — 47 mm —;
2. Colocamos uma vírgula após o valor dessa leitura — 47,0 mm —;
3. Verificamos a marca numerada imediatamente à esquerda da marca melhor alinhada e anotamos seu dígito — 7 —;
4. Finalmente, verificamos a posição da marca melhor alinhada a partir da última numerada — nesse caso, a segunda posição —. Como cada marca da escala auxiliar corresponde a 0,02 mm, “multiplicamos” por dois o “valor” da posição e anotamos o resultado ao fim — 47,24 mm —.

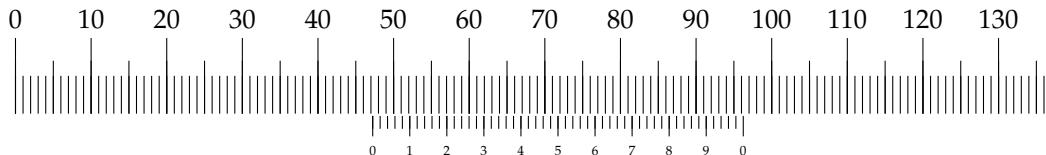


Figura 1.12: Leitura de 47,24 mm. Note o entre alinhamento a segunda marca após a marca “2” na escala auxiliar e a marca da escala principal.

Uma observação importante ao se utilizar equipamentos dotados de escala auxiliar é a realização de medidas que coincidem com as marcas maiores da escala auxiliar. Na Figura 1.13, por exemplo, temos uma medida em que a marca da escala auxiliar que está alinhada à da escala principal é a denotada pelo número 2. Efetuando a leitura, temos 33,2 mm. No entanto, temos o último dígito, dado pela “posição” da marca alinhada “multiplicada” por dois. Se a marca alinhada é a numerada, então a posição é zero. Logo, devemos adicionar um zero ao final da medida: 33,20 mm. Uma maneira mais simples de interpretar essa questão é verificarmos que o número de algarismos após a vírgula em uma dada unidade para um instrumento qualquer é sempre o mesmo. Assim, temos que no caso do paquímetro dos exemplos acima o número é sempre de duas casas após a vírgula ao se efetuar medidas em milímetros.

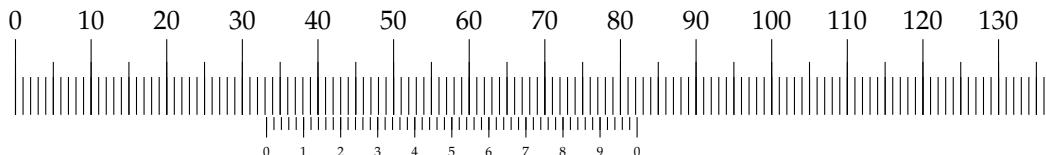


Figura 1.13: Leitura de 33,20 mm. Note o entre alinhamento a marca “2” na escala auxiliar e a marca da escala principal.

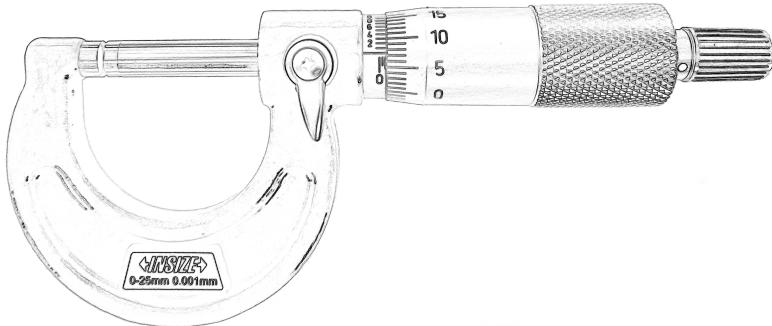


Figura 1.14: Micrômetro com escala auxiliar: as marcas à esquerda podem se alinhar com as marcas do tambor (região numerada de 0 a 15 na figura e que pode girar), indicando a leitura apropriada para o último dígito (aquele que é estimado em um micrômetro sem escala auxiliar). Na Figura 1.15 temos uma imagem da região da escala auxiliar.

1.2.3 Unidades e algarismos significativos, notação científica

O número de algarismos significativos de uma medida está ligado à precisão do equipamento utilizado para realizá-la. Devido a isso, se realizarmos uma conversão de unidades, não podemos ter uma alteração no número de algarismos significativos — afinal a precisão não aumenta nem diminui —. Isso nos leva a contemplar as duas seguintes situações:

1. Realizarmos uma medida e obtemos

$$\ell = 34,82 \text{ mm}, \quad (1.4)$$

onde o último algarismo foi estimado. Sabemos que temos quatro algarismos significativos e ao expressarmos esta medida em outras unidades, devemos manter o mesmo número de algarismos significativos. Podemos então expressá-la como

$$\ell = 3,482 \text{ cm} \quad (1.5)$$

$$= 0,3482 \text{ dm} \quad (1.6)$$

$$= 0,03482 \text{ m}. \quad (1.7)$$

Note que os zeros à esquerda não são algarismos significativos. Sua função é exclusivamente a de posicionar a vírgula, dando aos algarismos a ordem de grandeza adequada.

2. Realizamos uma medida de massa obtemos,

$$m = 11,2 \text{ kg}, \quad (1.8)$$

e desejamos expressá-la em gramas. Efetuando a conversão, poderíamos escrever em um primeiro momento

$$m = 11\,200 \text{ g}. \quad (1.9)$$

Uma medida assim expressa, no entanto, tem cinco algarismos significativos — pois o último algarismo anotado é o duvidoso —, enquanto a medida original tem três. Portanto, por mais que possamos adicionar zeros ao lado esquerdo sem modificar o número de significativos, não podemos fazê-lo do lado direito.

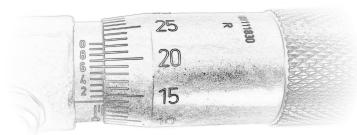


Figura 1.15: Detalhe da escala auxiliar de um micrômetro.

Para expressar essa medida com o número adequado de algarismos significativos, podemos utilizar a notação científica. Um número expresso em notação científica tem a forma $a \cdot 10^b$, onde a — denominada *mantissa* — é um número Real, e b — o expoente — é um número inteiro. O expoente também é conhecido como *ordem de grandeza*. Em um número expresso dessa forma, somente os algarismos da mantissa são significativos. Os prefixos kilo (k), hecto (h), deci (d), centi (c), mili (m), micro (μ), nano (n), etc., utilizados em unidades de medida são simplesmente formas abreviadas para as notações $\cdot 10^3$, $\cdot 10^2$, $\cdot 10^{-1}$, $\cdot 10^{-2}$, $\cdot 10^{-3}$, $\cdot 10^{-6}$, $\cdot 10^{-9}$, etc.

Utilizando a notação científica temos então

$$m = 112 \cdot 10^2 \text{ g.} \quad (1.10)$$

Portanto, temos as seguintes regras:

- Conversões de unidade não alteram a precisão das medidas e por isso não podem alterar o número de algarismos significativos.
- Zeros à esquerda não contam como algarismos significativos.
- Não podemos adicionar zeros à direita. Se for necessário fazê-lo ao efetuar uma conversão de unidades, devemos utilizar a notação científica.

1.2.4 Operações envolvendo medidas

Lembre-se que em uma medida direta, o algarismo duvidoso está ligado à ideia de que ele seria o algarismo que possivelmente sofreria alterações caso utilizássemos equipamentos mais precisos para realizar as medidas. Isso também se reflete nos valores calculados para medidas indiretas, afinal elas são calculadas a partir de medidas diretas, que têm um algarismo duvidoso. Portanto, ao obtermos uma medida indireta, também devemos denotá-la com o número adequado de algarismos significativos.

Para determiná-los, no entanto, devemos seguir algumas regras para as operações realizadas:

Multiplicação e divisão No caso da multiplicação ou da divisão, devemos limitar o número de algarismos significativos àquele da medida que tiver o menor número.

Para entender a razão dessa regra, podemos fazer a seguinte análise: Tomamos a medida indireta L dada por

$$L = \ell_1 \ell_2 \ell_3 \dots \quad (1.11)$$

onde $\ell_1, \ell_2, \ell_3, \dots$, são medidas diretas quaisquer. Vamos supor que ℓ_1 tem n algarismos significativos e que as demais têm mais algarismos significativos que ℓ_1 . Vamos supor ainda que o primeiro dígito (aquele com a maior ordem de grandeza) tem ordem de grandeza p , que o duvidoso ordem de grandeza d e que a diferença entre as ordens de grandeza desses dígitos é s . Agora fazemos o seguinte

1. Tomamos a ordem de grandeza d do algarismo duvidoso de ℓ_1 e multiplicamos pelas demais medidas;
2. Obtemos um valor com uma ordem de grandeza d' qualquer;
3. Qualquer dígito com uma ordem de grandeza menor que d' é então desprezível se comparado ao dígito com a ordem de grandeza d ;
4. Observamos no valor calculado para L que o dígito com a maior ordem de grandeza será p' . Esse dígito deve ser s' ordens de grandeza maior que d' .

A diferença s' nada mais é do que o número de algarismos significativos da medida L . Além disso s' é igual a s . Logo, o resultado deve ter o mesmo número de algarismos significativos que a medida ℓ_1 . Portanto, ao multiplicar duas ou mais medidas,

- Determinamos o número de algarismos significativos de cada uma das medidas que compõe o produto/divisão;
- Realizamos o produto/divisão;
- Ao fim, deixamos o resultado com o mesmo número de algarismos significativos que a medida que tem menos algarismos significativos.

Uma observação importante a se fazer é que se separarmos o cálculo em várias etapas, devemos levar mais algarismos do que o mínimo necessário entre as etapas (pelo menos um a mais). A razão disso é que a contribuição dos dígitos após o último significativo pode se acumular entre as etapas e dar um resultado levemente maior que no caso de os descartarmos. O descarte dos algarismos não-significativos deve ser feito ao final do cálculo.

EXEMPLO³:

$$12,03 \div 3,6 = 3,\bar{3}4 = 3,3 \quad (1.12a)$$

$$198,633 \times 3,211 = 637,\bar{8}1056 = 637,8 \quad (1.12b)$$

³ Utilizamos a barra para denotar o último algarismo significativo quando escrevemos dígitos além dele.

Soma e subtração Para o caso da soma ou subtração, mantemos o número de casas decimais da medida que tem o menor número de casas após a vírgula.

A razão disso é que se temos uma incerteza em um algarismo qualquer, dígitos à direita serão menores ou da ordem de grandeza da incerteza. Consequentemente, seria inútil expressá-los. Observe que para realizar a soma/subtração, é importante que todas as medidas sejam expressas na mesma unidade e ordem de grandeza.

EXEMPLO:

$$12,03 \text{ cm} + 3,6 \text{ cm} = 15,\bar{6}3 \text{ cm} \quad (1.13)$$

$$= 15,6 \text{ cm.} \quad (1.14)$$

Constantes Quando efetuamos uma operação envolvendo uma constante matemática e uma medida, conservamos no resultado o mesmo número de algarismos significativos da medida.

Nesse caso temos que a constante matemática não tem incerteza nenhuma, então podemos considerá-la com um número infinito de algarismos significativos.

EXEMPLO:

$$A = \pi \times (3,66 \text{ m})^2 \quad (1.15)$$

$$= \pi \times (13, \bar{3}956 \text{ m}^2) \quad (1.16)$$

$$= 42, \bar{0}8351855 \text{ m}^2 \quad (1.17)$$

$$= 42,1 \text{ m}^2. \quad (1.18)$$

⁴ Uma série de potência é uma forma de escrever uma função em termos de potências, somas e subtrações. Em geral, tais séries contém um número infinito de termos.

As funções trigonométricas $\sin x$ e $\cos x$, por exemplo, são descritas pelas séries

$$\sin x = x - \frac{x^3}{3!} + \frac{x^5}{5!} - \frac{x^7}{7!} + \dots$$

$$\cos x = 1 - \frac{x^2}{2!} + \frac{x^4}{4!} - \frac{x^6}{6!} + \dots,$$

onde x é um ângulo expresso em radianos.

Funções Quando uma medida é o argumento de uma função, mantemos para o resultado o número de algarismos significativos da medida.

Uma maneira de entender isso é o fato de que podemos escrever funções como séries de potência⁴ — que são basicamente multiplicações, somas e subtrações —. Dessa forma, podemos verificar que ao tomarmos a medida e realizarmos o produto por ela mesma, devemos ter um resultado com o mesmo número de algarismos significativos para todas as parcelas que serão somadas/subtraídas, sendo que o número de casas após a vírgula fica determinado pelo primeiro termo que não é constante. Assim, ao somarmos, a parcela maior dominará e teremos que o resultado terá o mesmo número de algarismos significativos que o argumento da função⁵.

EXEMPLO:

$$x = \ln 3,555 \quad (1.19)$$

$$= 1,26\bar{8}355063 \quad (1.20)$$

$$= 1,268. \quad (1.21)$$

⁵ Isso é útil para podermos truncar a soma da série a um número pequeno de parcelas, afinal não faz sentido calcular parcelas que têm valores menores que a incerteza das parcelas dominantes

1.2.5 Arredondamento

Nos exemplos da seção anterior, usamos uma barra para denotar o último algarismo significativo antes de descartar os algarismos excedentes. Sempre que os descartarmos, devemos fazê-lo observando os critérios de arredondamento.

Quando obtemos resultados do tipo

$$\ell = 134, \bar{3}9487, \quad (1.22)$$

precisamos fazer um *arredondamento*. No exemplo acima, vemos que 134,4 é um número mais próximo do resultado do que 134,3. Portanto, adotamos as seguintes regras ao realizarmos o arredondamento:

1. Se o algarismo seguinte ao duvidoso for menor que 5, simplesmente descartamos os algarismos excedentes.
2. Se o algarismo seguinte ao duvidoso for maior ou igual a 5, aumentamos o duvidoso de uma unidade e descartamos os demais.

Esse critério de arredondamento não é único. Em algumas situações se utiliza uma regra específica para o caso de o algarismo seguinte ao duvidoso ser 5: analisa-se o algarismo seguinte a esse e caso ele for par, se arredonda para cima e caso for ímpar, para baixo.

2 Gráficos

Uma maneira simples de verificar a relação entre duas grandezas é a elaboração de um gráfico de dispersão. Apesar de não podermos verificar valores exatos em um gráfico, uma observação do comportamento geral de um conjunto de pontos pode ser muito esclarecedora, principalmente se levarmos em conta que todas as medidas efetuadas sofram uma dispersão aleatória em torno de seus valores ideais. Verificaremos como elaborar um gráfico de maneira a evidenciar o comportamento das variáveis consideradas e, no Capítulo 4, verificaremos como descrever de maneira idealizada a dependência entre as variáveis.

2.1 Gráficos

Um gráfico é uma maneira de transformar um conjunto de dados numéricos em uma figura, relacionando valores numéricos a escalas de cor, distâncias ou áreas. No livro *The Visual Display of Quantitative Information*¹, Edward R. Tufte afirma que

Gráficos mostram quantidades visualmente através do uso combinado de pontos, linhas, um sistema de coordenadas, números, símbolos, palavras, sombreamento, e cor.

e que

Gráficos modernos podem fazer muito mais que simplesmente substituir pequenas tabelas de dados. Quando utilizados em seu máximo potencial, gráficos são instrumentos para raciocinar sobre informações quantitativas. Frequentemente a maneira mais efetiva para descrever, explorar, e sumarizar um conjunto de números — mesmo um conjunto muito grande — é através de figuras de tais números.

Tufte afirma que talvez em virtude da diversidade de técnicas e informações necessárias — habilidades artísticas e matemáticas, dados experimentais — a utilização de figuras abstratas para representar números é relativamente recente (1750 em diante). Dentre os autores que desenvolveram o campo da representação gráfica de dados, ele destaca o trabalho de William Playfair, que desenvolveu melhorias para vários tipos de gráficos. Tufte também destaca o trabalho de Johann Heinrich Lambert² que percebe que os gráficos não precisam necessariamente relacionar quantidades em analogia ao mundo físico — como séries temporais, isto é, a evolução de um valor qualquer de acordo com a evolução do tempo —, mas podem ser elaborados para quaisquer duas variáveis cujas relações desejamos verificar:

Temos em geral duas quantidades variáveis, x , y , que serão comparadas uma à outra por observação, de forma que para cada valor de x — que

¹ Edward R. Tufte. *The Visual Display of Quantitative Information*. Cheshire, Connecticut: Graphics Press, 2001. ISBN: 0-9613921-4-2

² Johann Heirich Lambert. "Beyträge zum Gebrauche der Mathematik und deren Anwendung". Em: Edward R. Tufte. *The Visual Display of Quantitative Information*. Cheshire, Connecticut: Graphics Press, 2001, p. 45. ISBN: 0-9613921-4-2

pode ser considerada como uma abscissa — determinamos a ordenada correspondente y . Se as observações experimentais fossem completamente precisas, essas ordenadas resultariam em um número de pontos através dos quais uma curva ou uma reta deveriam ser traçadas.²

Existem vários tipos de gráficos, cada um com o objetivo de evidenciar características específicas do conjunto de dados em questão:

- *Gráficos de setores* servem bem o propósito de mostrar a contribuição relativa de várias parcelas que perfazem um todo;
- *Gráficos de colunas/barras* servem para comparação entre diversos valores absolutos;
- *Gráficos de colunas/barras empilhadas* denotam valores absolutos e demonstram a composição relativa de várias contribuições para o todo. Une as propriedades dos dois tipos anteriores;
- *Séries temporais* denotam a evolução temporal de variáveis com o tempo;
- *Mapas de dados* servem para demonstrar dados que variam de acordo com a distribuição geográfica;
- *Gráficos de dispersão* permitem verificar a relação entre duas variáveis quaisquer;
- *Histogramas* são similares aos gráficos de barra, mas voltados à apresentação de contagens de eventos em diversos intervalos;

além de outros tipos. Em comum a todos os tipos de gráfico, está a utilização de dimensões como área e comprimento, ou tonalidades de cor, para representar informações numéricas.

Temos especial interesse nos gráficos de dispersão. Esse tipo de gráfico serve para verificar relações de causa e efeito entre duas variáveis quaisquer. De acordo com Tufte,

[...] Na literatura científica moderna, em torno de 40% dos gráficos publicados têm uma forma relacional, com duas ou mais variáveis. Isto não é sem propósito, já que os gráficos relacionais — em sua forma mais simples, o gráfico de dispersão e suas variantes — é o mais formidável de todos os tipos de gráficos. Eles ligam pelo menos duas variáveis, encorajando e mesmo suplicando que o leitor se pergunte qual é a possível relação causal entre elas. Eles confrontam as teorias causais [...] com evidências empíricas.

De fato, estamos interessados em verificar experimentalmente a relação entre diversas variáveis através de experimentos. Além disso, desejamos testar teorias científicas, procurando confirmar ou refutar suas validades.

Finalmente, como recomendações gerais para a elaboração de gráficos, Tufte destaca:

- *A representação de números através de medidas de superfície em um gráfico deve ser proporcional às quantidades numéricas representadas.*³

³ Esse item é bastante visível ao se analisar um gráfico de campanha política: o candidato que deseja evidenciar sua vantagem costuma realizar um corte de forma que o zero não seja no menor valor da escala mostrada e também adota uma largura maior para sua coluna. Dessa forma uma diferença insignificante (menor que o erro da própria pesquisa) parece muito grande.

- Cada parte de um gráfico gera expectativa visual sobre as outras partes. Se uma escala que se move em intervalos regulares, por exemplo, se espera que ela continue a fazê-lo. Mostre a variação dos dados, não variação na elaboração do gráfico.
- Em séries temporais, ao se mostrar dados relativos a dinheiro, geralmente é melhor utilizar quantidades corrigidas pela inflação.
- O número de dimensões utilizadas para demonstrar informações não deve exceder o número de dimensões dos dados⁴.
- Acima de tudo, mostre os dados.⁵

2.2 Gráficos de dispersão

Gráficos de dispersão são ferramentas muito usadas para visualizar relações matemáticas entre uma função e seu argumento. Por exemplo, sabemos que a função $f(x) = A + Bx$ é uma equação da reta, pois seu gráfico é uma reta. Cada função tem um gráfico característico.

Em experimentos de laboratório é comum procuramos estabelecer a relação entre duas grandezas. Uma delas variamos arbitrariamente e denominamos como **variável independente**, já a outra medimos e — como seus valores variam em resposta aos da variável independente — a denominamos como **variável dependente**. Tais variáveis são representadas nos eixo x (abscissas) e y (ordenadas), respectivamente, sendo o primeiro o eixo horizontal e o segundo o vertical. É comum nos referirmos a um gráfico como sendo do tipo $\Delta x \times t$, $\Delta L \times \Delta T$, etc. — ou ainda Δx vs t , ΔL vs ΔT , etc. —. Nessa notação, a variável à esquerda do símbolo \times , ou do *vs* (*versus*), denota a quantidade que corresponde ao eixo vertical, enquanto o símbolo à direita denota a variável que corresponde ao eixo horizontal.

O maior objetivo de uma teoria é justamente encontrar a relação matemática f que relaciona x e y , ou seja, que nos dá y em função de x : $y = f(x)$. Isso não é algo que possa ser retirado dos gráficos de uma maneira simples, por diversas razões. Primeiramente, os dados experimentais se distribuem em torno do comportamento ideal devido a variações aleatórias. Além disso, mesmo que possamos tirar uma conclusão a partir do gráfico, tal conclusão só é válida para o intervalo de valores que compreende as medidas, podendo ser diferente em outras regiões. Finalmente, uma relação extraída dos dados experimentais não consegue explicar em argumentos lógicos o mecanismo que relaciona uma variável à outra, portanto não explicando o comportamento. De qualquer forma, uma gráfico que mostra uma dependência confiável de uma variável em relação a outra já abre um caminho para a investigação. Também podemos utilizar os dados experimentais para *verificar a validade de previsões teóricas*.

⁴ As dimensões são as maneiras diferentes que os dados podem variar. Se, por exemplo, desejamos comparar o número de habitantes de diversas cidades, devemos utilizar uma figura com uma dimensão (um gráfico de barras) e não com duas (a área de um círculo).

⁵ Isto é, faça um gráfico simples, sem floreios, que mostre os dados.

2.2.1 Principais elementos de um gráfico de dispersão

Os elementos mais notáveis de um gráfico de dispersão são:

Eixos: Os valores das variáveis dependente e independente são expressos pelas distâncias ao longo dos eixos vertical e horizontal em relação à origem (encontro dos dois eixos). Muitas vezes os valores das variáveis são distantes de zero e não podem ser verificados adequadamente se um dos eixos — ou mesmo ambos — iniciarem em zero. Por isso, é comum que se realizem “cortes” nos eixos de maneira que eles não iniciem em zero. Nesse caso, os valores são expressados por meio da distância relativa que os pontos ocupam entre duas marcas numeradas nos eixos (veja o item seguinte). Os eixos devem ser nomeados com a variável que está sendo representada e suas unidades.

Escalas: Para que a leitura do gráfico possa ser efetuada de uma maneira quantitativa, ainda que aproximada, é importante que se efetuem marcas nos eixos e que tais marcas sejam numeradas com os valores que elas representam no eixo. Tais marcas não precisam iniciar em zero, porém devem ser efetuadas em intervalos regulares e com números de fácil leitura. Nas escalas não devem ser marcados os valores das abscissas e ordenadas dos pontos⁶.

Pontos experimentais: Os dados experimentais são representados através de pontos na área retangular delimitada pelos eixos horizontal e vertical. A localização dos pontos é aquela do encontro das retas paralelas aos eixos horizontal e vertical e que passam pelas posições desses eixos que correspondem aos valores que desejamos representar. Para que o ponto seja facilmente visível, indica-se a utilização de quadrados, círculos, triângulos, etc. centrados no ponto de encontro das retas. Caso mais que um conjunto de dados seja representado no mesmo gráfico, devem ser utilizados símbolos diferentes para cada conjunto.

Como elementos opcionais, temos:

Legenda: Se temos somente um conjunto de dados, a legenda pode ser dispensada. No entanto, se temos dois ou mais conjuntos — ou mesmo curvas —, representados no mesmo gráfico, é essencial que seja feita uma legenda indicando o que cada símbolo representa.

Linha de tendência: Uma reta ou curva que represente o comportamento “médio” dos pontos é denominada como *linha de tendência*. Muitas vezes estaremos interessados nesse tipo de curva, porém verificaremos como calculá-las adequadamente no Capítulo 4. Tal curva deve ficar restrita à área do gráfico que contém os dados experimentais (entre os valores mínimo x_{min} e máximo x_{max} para as abscissas dos dados experimentais).

Título: Um título pode ser adicionado ao gráfico indicando como eles foram obtidos. Um exemplo de título adequado é “Valores do deslocamento de um corpo em queda livre em função do tempo”;

⁶ Exceto no caso em que os próprios valores das variáveis ocorrem em intervalos regulares e tais intervalos correspondem ao mais adequado para a escala do eixo. Isso ocorre mais comumente com os valores do eixo independente (horizontal).

Uma versão inadequada desse título seria “Gráfico de Δx em função de t ”.

Muitas vezes alguns desses elementos são omitidos. O título e a legenda, por exemplo, podem ser descritos na *legenda da figura* — o pequeno texto que aparece abaixo das figuras, como na Figura 2.1 —. Já a linha de tendência pode ser omitida por não ser de interesse do autor do gráfico.

Exemplo de um gráfico de dispersão

Se tomarmos as medidas da Tabela 2.1, podemos fazer um gráfico como o da Figura 2.1. Nesse gráfico podemos perceber que foram aplicados alguns princípios básicos para a elaboração de um gráfico adequado:

- O gráfico deve ter os dois eixos com numerações que aparecem em *intervalos regulares* — a cada 100 no eixo x e a cada 10 no eixo y —.
- O eixo y foi “cortado”, iniciando em 20. Isto é adequado pois não existem dados cujos valores da variável dependente sejam menores que 20.
- Os eixos começam e terminam em valores que permitem que toda a área disponível do gráfico é bem utilizada.
- O gráfico possui uma legenda indicando o que os pontos representam.
- Os eixos foram nomeados e indicam as unidades dos dados.
- O título descreve sucintamente o que o gráfico representa.

Tubo 1		Tubo 2	
t (s)	T °C	t (s)	T °C
0	98	0	92
5,71	93	8,27	87
17,79	88	17,43	82
34,50	83	31,07	77
61,63	78	44,98	72
83,96	73	67,78	67
109,09	68	96,57	62
130,78	63	115,26	57
149,09	58	135,78	52
184,21	53	170,32	47
217,09	48	213,28	42
261,28	43	268,04	37
315,90	38	349,44	32
373,35	33	465,71	27
470,55	28	575,21	24
504,21	25		

Tabela 2.1: Dados para a temperatura de tubos metálicos em função do tempo para o processo de resfriamento convectivo.

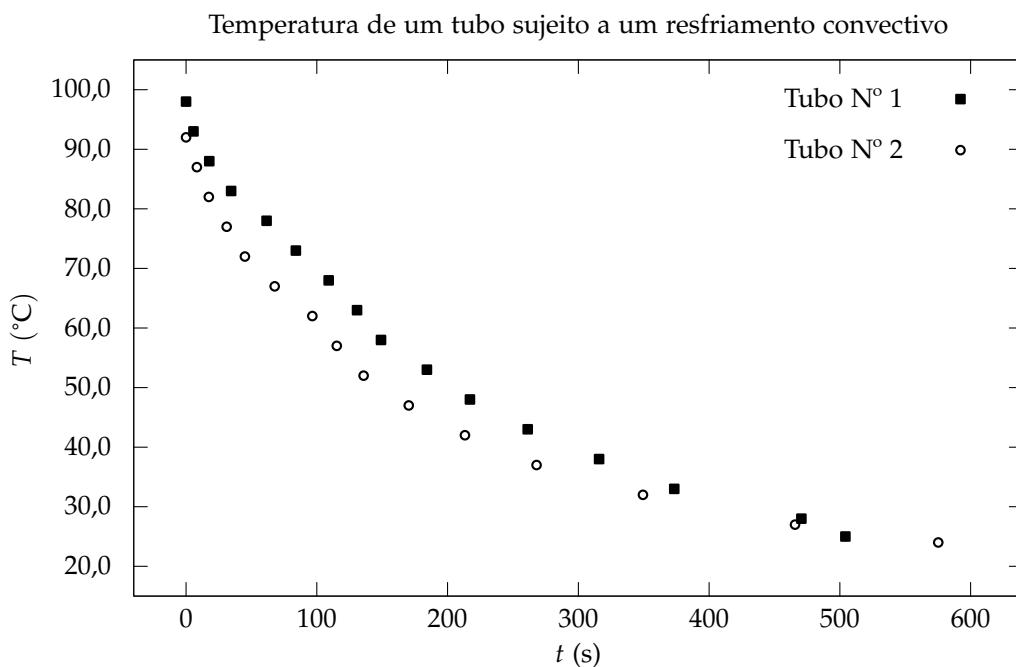


Figura 2.1: Gráfico dos dados da Tabela 2.1.

2.2.2 Problemas mais comuns em gráficos de dispersão

A elaboração de um gráfico não é uma tarefa que podemos reduzir a um certo número de passos. Um gráfico deve ser utilizado de maneira a evidenciar dados ou seu comportamento e muitas vezes isso implica em fugirmos das regras mais comuns: por exemplo, se desejamos mostrar com o auxílio de uma linha de tendência qual é o valor estimado da variável dependente em uma região do gráfico distante dos pontos experimentais. De qualquer forma, podemos recomendar que os seguintes itens sejam evitados:

Não utilizar adequadamente a área do gráfico: Muitas vezes nossos dados não iniciam em zero. Nesse caso devemos escolher um número próximo, porém inferior, ao primeiro valor que ocorre naquele eixo e iniciar o eixo em tal número. Se, por exemplo, devemos marcar em um eixo os valores 107,25, 115,12, 129,90, 138,22, etc., uma boa escolha é iniciar o eixo em 100 e realizarmos as marcações no eixo a cada 10. Outra escolha adequada seria iniciar o eixo em 105 — porém, nesse caso, não marcamos o “canto” do gráfico como 105 —. Realizamos a marcação em 110 e daí em diante a cada 10.

Não utilizar espaçamento regular na numeração dos eixos: Marcações irregulares, isto é, com “espaçamento variável” não devem ser realizadas. Utilizando os dados do item acima, poderíamos realizar marcações no eixo em 105, 115, 130 e 140. Porém a distância entre essas marcações não é regular, o que dificulta a leitura do gráfico.

Marcar os valores de x e y dos pontos experimentais: Os valores de abscissas e de ordenadas dos pontos não devem aparecer nos eixos ordenados. Veja que no gráfico da Figura 2.1 ocorrem muitos valores que ficam entre duas marcações quaisquer, porém os valores correspondentes aos pontos não devem ser marcados no eixo.

Linhas que ligam os pontos aos eixos: Muitos alunos ligam os pontos aos eixos x e y usando linhas tracejadas. Tais linhas não têm propósito nenhum e dificultam a visualização dos pontos experimentais. Caso queiramos saber exatamente os valores das variáveis independente e dependente, podemos verificar-las na tabela de dados.

Linhas que ligam os pontos entre si: Os pontos marcados a partir de dados experimentais nunca devem ser ligados entre si. Quando marcamos curvas ou retas em um gráfico, isso significa que temos conhecimento sobre todos os pontos que compõe aquela curva. Isso só pode ser razoável para curvas matemáticas, não para dados experimentais. Estes são verificados “pontualmente” e não podemos afirmar nada sobre o que obteríamos entre dois pontos quaisquer. Portanto, a reta que liga dois pontos experimentais não carrega informação alguma e não deve ser traçada. Veja a Figura 2.2 para um exemplo do que não fazer.

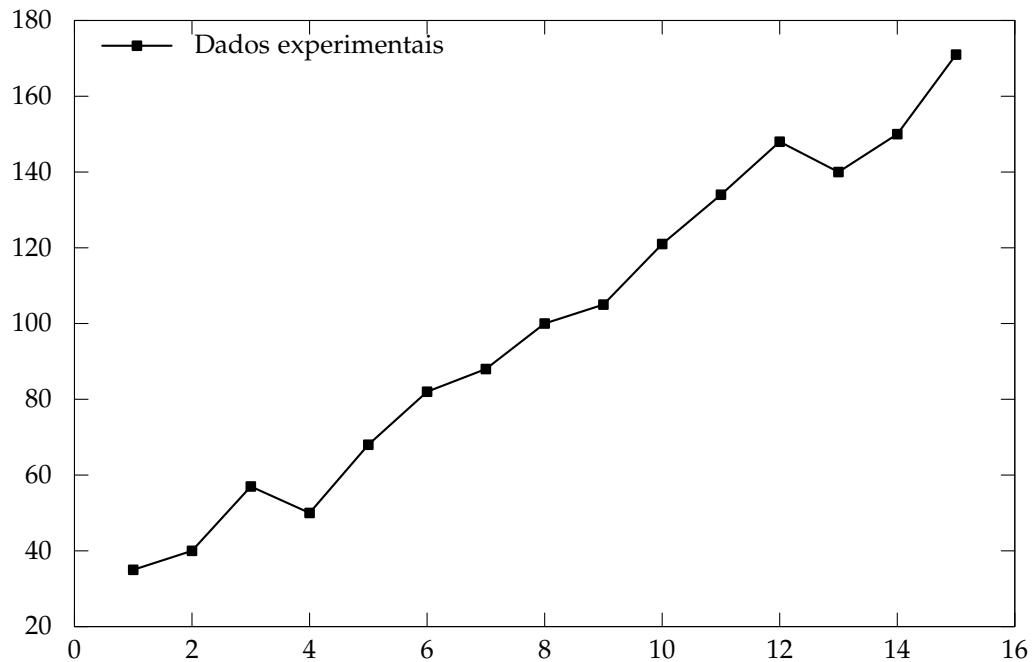


Figura 2.2: Exemplo do que não fazer:
ligar os pontos experimentais, não no-
mear os eixos, não colocar unidades.

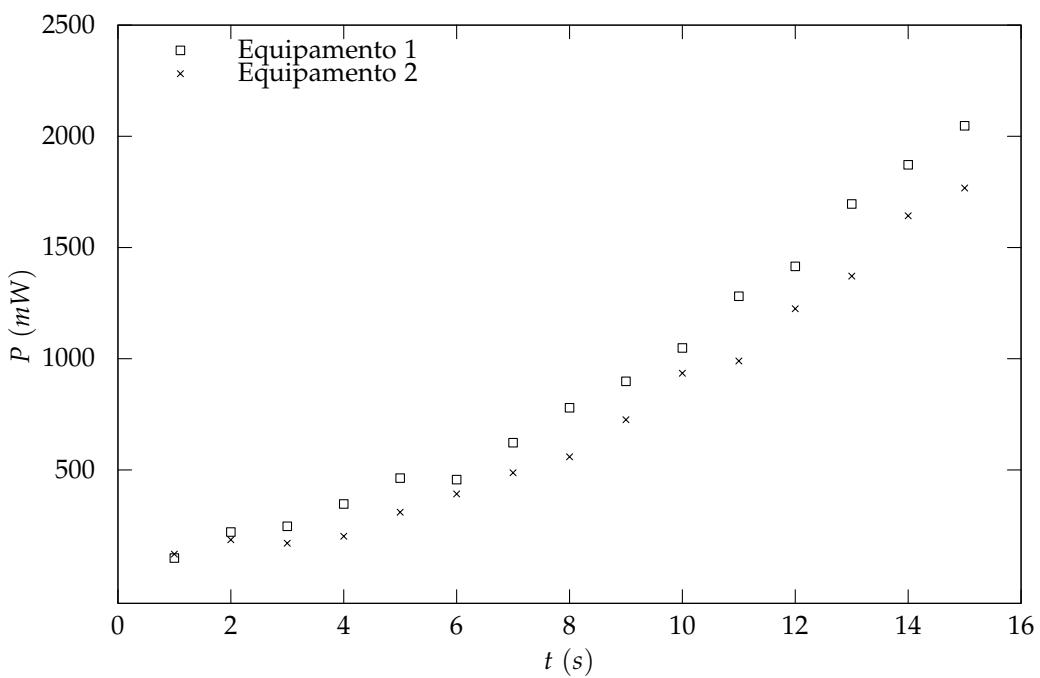


Figura 2.3: Exemplo de gráfico contendo
vários conjuntos de dados. Notem que
cada conjunto usa um símbolo diferente
para os dados e que não ligamos os pon-
tos. Além disso, fazemos um corte no
eixo x para aproveitar a área do gráfico.

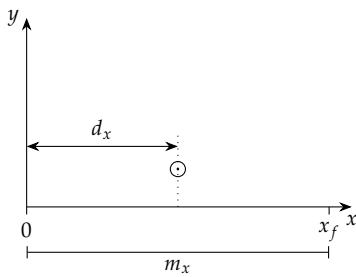


Figura 2.4: Variáveis para o cálculo da posição de um ponto em um gráfico em que o eixo x inicia em zero.

2.2.3 Elaborando um gráfico com papel milimetrado

Hoje podemos fazer um gráfico rapidamente usando um programa de computador. No entanto, é interessante fazer alguns gráficos com papel milimetrado e lápis/caneta para sabermos o que tais programas estão fazendo.

Elaborar um gráfico em papel milimetrado é uma questão de observar as regras gerais para a elaboração de gráficos e usar regras de três. O procedimento para elaborar o gráfico consiste no seguinte (veja a Figura 2.5):

1. Verificar quais os valores mínimo x_i e máximo x_f para o eixo x . Tais valores devem ser um pouco menor e um pouco maior que os valores mínimo e máximo para as abscissas dos dados experimentais, respectivamente.
2. Verificar quais os valores mínimo y_i e máximo y_f para o eixo y . Como no caso do eixo x , os valores escolhidos devem ser um pouco menor e um pouco maior que os valores das ordenadas dos pontos experimentais, respectivamente.
3. Verificar o tamanho do papel e desenhar os eixos *dentro da área milimetrada* e não na borda dessa área. Em geral, deixa-se um centímetro entre a borda da área milimetrada e o eixo para que possamos fazer as escalas. Com isso determinamos as medidas m_x e m_y dos eixos horizontal e vertical no papel.
4. Se escolhermos $x_i = 0$, temos que a distância m_x em relação à origem do eixo x representa o valor x_f que escolhemos para o final do eixo⁷. Isso é equivalente a dizer que cada unidade de medida no eixo x equivale a uma quantidade⁸

$$f_x = \frac{x_f}{m_x} \quad (2.4)$$

Assim, se precisamos representar um valor x_p de um ponto $P = (x_p, y_p)$ qualquer, calculamos a distância d_x em relação à origem — veja a Figura 2.4 — através de⁹

$$d_x = \frac{x_p}{f_x} = x_p \frac{m_x}{x_f}. \quad (2.5)$$

Se fazemos um corte no eixo x em um valor x_i , temos que uma unidade de medida nesse eixo representa uma quantidade (veja a Figura 2.5)

$$f_x = \frac{x_f - x_i}{m_x}. \quad (2.6)$$

Dessa forma, se precisamos representar um valor x_p , devemos dividir pelo fator f_x somente o valor que *excede* o valor do corte x_i . Portanto, a distância d_x é dada por¹⁰,

$$d_x = \frac{(x_p - x_i)}{f_x} = (x_p - x_i) \frac{m_x}{x_f - x_i}. \quad (2.7)$$

⁷O raciocínio para o eixo y é o mesmo, por isso mostramos somente para o eixo x .

⁸O que temos é uma regra de *proporção*, ou seja, uma regra de três:

$$d \quad - \quad x_p \quad (2.1)$$

$$m \quad - \quad x_f, \quad (2.2)$$

o que resulta em

$$d_x = x_p \frac{m_x}{x_f}. \quad (2.3)$$

⁹Note que a fração que aparece nessa equação é um valor constante. Calculando tal valor podemos simplesmente multiplicá-lo pelo valor x_p de cada ponto para descobrir quanto cada um dista da origem.

¹⁰Veja que se tivermos um ponto em que x_p é igual a x_i , ele deve ficar sobre a posição de corte do eixo ($d_x = 0$), o que está de acordo com o que a equação prevê. Note também que novamente o valor da fração é constante, facilitando o cálculo da distância.

Vamos considerar, por exemplo, um conjunto de dados cujas abscissas correspondem a uma variável t , cujas unidades são segundos. Verificamos que o menor valor de abscissa para os pontos é 36,29 s e o maior 104,04 s. Todas as abscissas estão compreendidas entre 30 s e 110 s e podemos escolher tais valores¹¹ como o início e o fim do eixo x . A medida do eixo no gráfico é $m_x = 25,00$ cm. Assim, se desejamos encontrar a distância d_x a partir do início do eixo em que devemos marcar um ponto cuja abscissa é $x_p = 47,20$ s temos

$$d_x = (47,20 - 30) \frac{25,00}{110 - 30} \quad (2.8)$$

$$= 5,375 \text{ cm.} \quad (2.9)$$

5. Podemos determinar a posição do ponto $P = (x_p, y_p)$ no eixo y de maneira análoga, calculando a distância d_y através de

$$d_y = (y_p - y_i) \frac{m_y}{y_f - y_i}. \quad (2.10)$$

6. Também podemos calcular a posição de uma marca das escalas dos eixos x e y utilizando as Equações (2.7) e (2.10). Para isso basta utilizarmos o valor que desejamos marcar no lugar da abscissa x_p ou da ordenada y_p . Após encontrarmos a posição das duas primeiras marcas, no entanto, basta verificar a distância entre elas e utilizá-la para marcar a posição das demais marcas, já que o espaçamento deve ser constante.

¹¹ Outra escolha possível seria entre 35 s e 105 s. No entanto, devemos tomar cuidado com a escolha pois alguns pontos podem ficar muito próximos dos eixos, dificultando a leitura do gráfico.

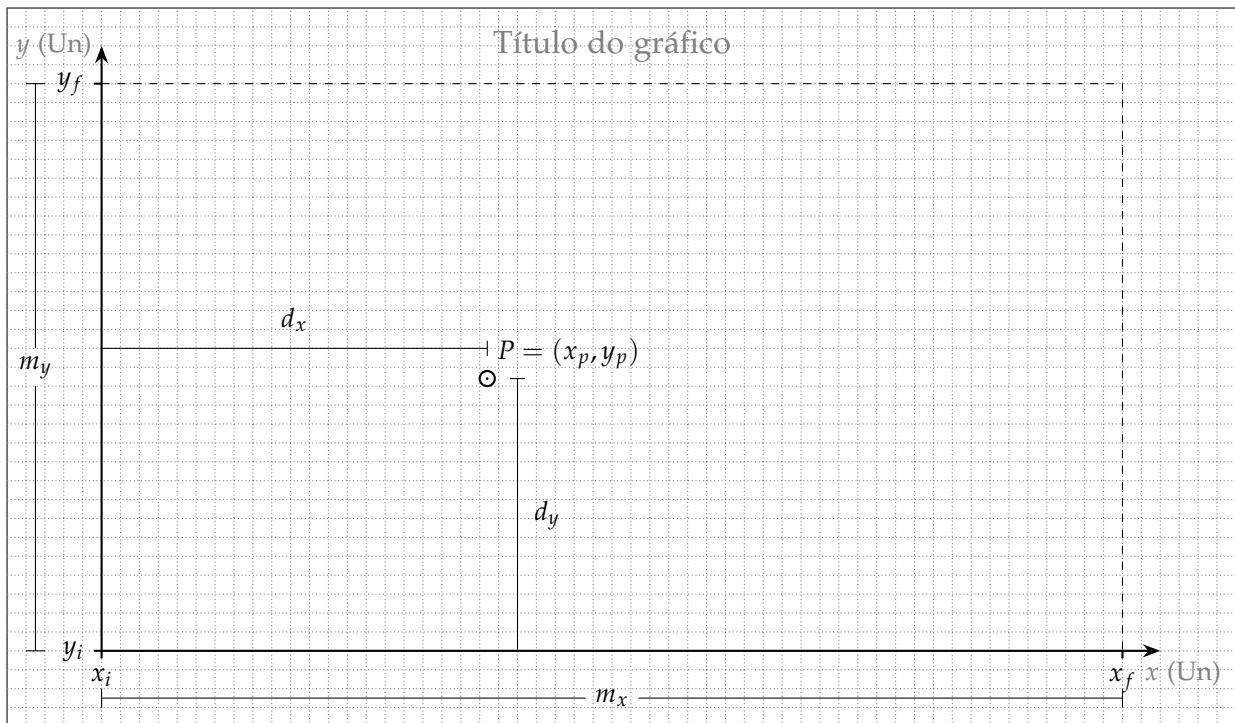


Figura 2.5: Esquema para a elaboração de um gráfico em papel milimetrado.

Utilizando o procedimento acima, todos os pontos experimentais estarão distribuídos dentro da área demarcada pelo valor máximo y_f no eixo y e pelo valor máximo x_f no eixo x — na Figura 2.5, a região

retangular delimitada pelos eixos x e y , e pelas retas tracejadas —. Veja que o adequado aproveitamento dessa região está diretamente ligado aos valores escolhidos para x_i , y_i , x_f e y_f : se, por exemplo, escolhermos valores para x_i e y_i que não sejam menores que os valores mínimos das abscissas e ordenadas dos pontos, teremos pontos abaixo do eixo x , à esquerda do eixo y , ou ambos. Outro problema, nesse caso, é que os pontos podem ficar sobre os eixos ou muito próximos deles, dificultando a sua visualização. Por outro lado, se escolhermos valores para x_i e y_i muito menores que os valores mínimos das abscissas e ordenadas dos pontos, teremos grandes regiões vazias à esquerda e/ou abaixo dos pontos do gráfico. Analogamente, devemos escolher valores de x_f e y_f que sejam maiores que os valores máximos das abscissas e ordenadas dos pontos, porém não muito maiores: se escolhermos valores menores que os máximos, teremos pontos fora do gráfico; se escolhermos valores muito maiores que os máximos, teremos regiões vazias à direta e/ou acima dos pontos experimentais.

Uma dificuldade prática dos cálculos acima é a de que muitas vezes eles incorrem em fatores de escala não muito práticos, pois resultam em números “quebrados” que tornam a marcação dos pontos no papel milimetrado suscetível a erros. Uma maneira de contornar esse problema é aproximarmos a escala: tomando o eixo x , por exemplo, calculamos através dos valores x_f , x_i e m_x um fator de escala f_x onde

$$f_x = \frac{x_f - x_i}{m_x}. \quad (2.11)$$

Após calculá-lo, o arredondamos para algum dos valores seguintes: 1, 2, 2,5, 4, 5 ou 10, ou qualquer múltiplo ou submúltiplo decimal desses (isto é, esses números multiplicados por 10 elevado a alguma potência inteira), sempre fazendo o arredondamento para cima. A partir desse valor arredondado f'_x , podemos calcular a distância d_x entre o início do eixo e o ponto através de

$$d_x = \frac{x_p - x_i}{f'_x}. \quad (2.12)$$

3 Erros

Se precisamos fabricar uma peça de um mecanismo, as tolerâncias nas medidas são em geral muito pequenas, portanto não podemos utilizar equipamentos de medida pouco precisos. Verificaremos que todas as medidas têm um limite de validade dado pela incerteza na medida, sendo que um aumento na precisão de uma medida significa uma diminuição em tal incerteza. Verificaremos quais as origens dos erros e como propagá-los no cálculo de uma medida indireta.

3.1 Erros de medidas

Se, por exemplo, tomarmos uma trena cujas divisões são em decímetros e a utilizarmos para medir o diâmetro de um tubo de PVC e com essa informação adquirir uma conexão para o tubo, corremos um grande risco de adquirir uma conexão com um diâmetro inadequado. Claramente estamos usando um instrumento de medida com uma escala inadequada. Nunca é possível se conhecer uma medida com exatidão: Sempre que efetuamos uma medida, a ela estará associada uma incerteza, ou um “erro”. Determinar esse erro nos permitirá conhecer o limite de utilidade de uma medida.

Outro fator que dificulta o processo de medida é o fato de que medições sucessivas podem resultar em valores diferentes: se cronometrarmos o tempo de queda de um objeto de uma certa altura com uma precisão razoável, observaremos valores diferentes em cada medida. O tratamento desse tipo de incerteza requer técnicas provenientes da análise estatística, possibilitando a obtenção de um valor mais provável.

Portanto, a determinação do valor de uma medida não é uma tarefa fácil. Além de requerer um método e equipamentos apropriados, precisamos também de uma análise matemática dos resultados para determinar o valor mais adequado. No caso de uma grandeza calculada a partir de outras, precisamos ainda determinar o erro associado, de forma a ter uma ideia de quanto confiável é o nosso resultado. Essas tarefas nem sempre são fáceis e dão origem a uma série de métodos que compõe uma *teoria de tratamento de erros e medidas*. No laboratório aplicaremos alguns conceitos descritos a seguir.

3.2 Medidas e erros

Ao efetuarmos uma medição no dia a dia, nos contentamos em atribuir à medida um valor e uma unidade. Expressamos a medida de uma sala, por exemplo, como

$$\ell = 4,32 \text{ m.} \quad (3.1)$$

Entretanto, associada a toda medida existe uma *incerteza* ou *erro*. Tal erro pode ser composto por três partes: erros sistemáticos, erros de escala e erros aleatórios. Podemos então descrever uma medida mais precisamente ao escrevermos

$$\ell = (4,32 \pm 0,05) \text{ m}, \quad (3.2)$$

o que nos diz que além de sabermos que nossa medida é da ordem de 4,32 m, ela pode variar de 0,05 m para mais ou para menos.

É importante destacarmos que o erro é expresso com somente um algarismo significativo. Uma exceção importante a essa regra é no caso de termos erros cujo primeiro algarismo é 1: nesse caso se admite um erro com dois algarismos significativos. Veremos abaixo os tipos de erro e como calculá-los.

3.2.1 Tipos de erros

De uma forma geral, os erros de medida podem ser classificados em três categorias^{1,2}:

Erros sistemáticos São erros cuja causa é bem definida e sempre afetam as medidas da mesma maneira. Um exemplo disso são relógios desenvolvidos para usar como padrão de tempo a frequência de oscilação da corrente elétrica de instalações elétricas residenciais. Ocorre, no entanto, que diferentes países adotam frequências diferentes de oscilação da corrente: alguns usam 50 Hz outros 60 Hz (isto é, 50 ou 60 oscilações por segundo). Utilizar um desses relógios em uma região inadequada fará com que ele subestime ou superestime a passagem do tempo. O problema na medida do tempo é sistemático e por isso pode ser corrigido, seja usando um relógio adequado, seja calculando o tempo correto com base no tempo medido.

Apesar do fato de que — uma vez conhecido o erro sistemático — sua eliminação é relativamente simples, na prática este é um erro bastante difícil de se identificar. O primeiro passo visando garantir que as medidas não tenham erros sistemáticos é calibrar os instrumentos de medida. Tal calibração não pode ser realizada para um único valor, pois o erro pode ser nulo para tal medida e aumentar conforme se aumenta o valor medido. Ainda que essas medidas sejam tomadas, um instrumento pode ter problemas conforme se aumenta a magnitude dos valores a serem medidos, pode não ser exatamente linear para alguma faixa de valores, dentre outros problemas possíveis. No entanto, apesar de todos os cuidados, uma fonte de erro pode passar desapercebida, prejudicando as medidas obtidas.

Erros aleatórios Um erro aleatório é todo erro que faz variar a medida de maneira imprevisível, porém com igual probabilidade de subestimar ou superestimar o “valor real” da medida. Este tipo de incerteza, portanto, se opõe ao erro sistemático, que tenta a

¹ João J. Piacentini et al. *Introdução ao Laboratório de Física*. 2^a Edição. Editora da UFSC, 2001

² José Ricardo Marinelli e Flavio Renato Ramos de Lima. *Laboratório de Física I*. 2^a Edição. UFSC/EAD/CED/CFM, 2010. ISBN: 978-85-8030-001-7

subestimá-la *ou* superestimá-la. A aleatoriedade da incerteza possibilita que ela seja tratada através de métodos estatísticos, tornando factível a extração de valores de medida precisos através da rea-lização de várias medidas. O fato de a incerteza ser aleatória é algo bom: erros sistemáticos são muito mais difíceis de se eliminar, eliminar e tratar do que simplesmente aumentar o número de medidas e assim diminuir o erro, por mais que isso em geral envolva uma grande quantidade de trabalho para a obtenção dos dados.

Através de cálculos estatísticos, é possível se mostrar que ao se efetuar um grande número de medidas, a melhor estimativa para uma grandeza pode ser extraída através do cálculo da média das medidas. Assim, para um conjunto de medidas x_1, x_2, \dots, x_n , temos que o melhor valor é dado por³:

$$\langle x \rangle = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_N}{N} \quad (3.3)$$

$$= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad (3.4)$$

³ O símbolo $\langle \rangle$ em $\langle x \rangle$ denota a média da variável x .

Verificaremos no Capítulo 5 que a incerteza do processo de medição pode ser calculada através dos desvios das medidas em relação ao valor médio. Além disso, verificaremos que a incerteza na média das medidas diminui conforme o número de medidas aumenta, mesmo que cada uma delas tenham a mesma incerteza.

Erros de escala Ao realizarmos medidas utilizando um equipamento analógico, verificamos uma série de algarismos com absoluta cer-teza e estimamos um algarismo adicional. Este algarismo pode acabar sendo subestimado ou superestimado durante a leitura da escala do instrumento. Temos, portanto, uma fonte adicional de erros.

De maneira similar, em equipamentos digitais não sabemos qual seria o próximo dígito caso utilizássemos um equipamento com maior precisão e não sabemos se o equipamento simplesmente descarta os demais dígitos ou os utiliza para realizar arredonda-mentos. Assim a melhor estimativa da medida pode estar contida em um intervalo acima ou abaixo do valor apresentado pelo ins-trumento de medida. Portanto também temos fontes de incerteza relacionadas à medida no caso de um equipamento digital.

Em ambos os casos as incertezas estão ligadas à leitura das medidas e dependem das escalas utilizadas nos instrumentos de medida, dando origem ao que denominamos como *erros de escala*. Esse tipo de erro é o mais relevante para os experimentos realizados nos laboratórios didáticos, e o veremos em mais detalhes na próxima seção.

O erro total de uma medida é então composto pelos três erros descritos acima. Em uma situação qualquer, um deles pode ser muito maior que os demais, determinando o valor do erro. Um exemplo disso é o uso de cronômetros manuais nos quais a menor divisão

⁴ Veremos adiante como determinar o erro de escala.

da escala está em centésimos de segundo. Verificando o erro de escala, teremos um erro de um centésimo de segundo na medida⁴. No entanto, o tempo de reação do usuário do cronômetro é maior do que o erro de escala, levando a um erro aleatório da ordem de 0,2 s. Nesse caso o erro total é dado por 0,21 s, porém como utilizamos somente um algarismo significativo para denotar o erro, temos um erro de 0,2 s, que é o próprio erro aleatório — isto é, o erro aleatório é dominante —.

Quando temos um tipo de erro que é muito maior que os outros, precisamos considerar somente o erro dominante, descartando os demais. Em geral é isso o que acontece com medidas estáticas, como as realizadas por um paquímetro ou por uma régua: nesse caso o erro dominante é o de escala, enquanto o aleatório é desprezível. Como esse é o caso da maioria das medidas realizadas nas experiências de laboratório didático, focaremos nossa atenção predominantemente neste tipo de erro. Devido às dificuldades em tratar os erros sistemáticos, consideraremos que os aparelhos utilizados estejam devidamente calibrados e que não existe nenhum erro sistemático relevante.

3.3 Erros de escala em uma medida direta

Podemos dividir a questão do erro de escala de uma medida direta em dois casos, conforme o tipo de equipamento que estamos utilizando:

Equipamentos analógicos: Se utilizarmos um equipamento analógico — como uma régua milimetrada, por exemplo — podemos verificar medidas menores que 1 mm se estimarmos valores entre uma casa de milímetros e outra. Podemos dizer que o erro associado deve ser claramente menor que 1 mm, pois ao realizar uma medida de — por exemplo — 13,41 cm, um erro de 1 mm poderia levar essa medida ao valores extremos $\ell - \delta\ell = 13,31$ cm e $\ell + \delta\ell = 13,51$ cm: Claramente há um exagero, afinal tais medidas estariam muito próximas das marcas de 13,3 cm e 13,5 cm que conseguimos distinguir perfeitamente em uma régua. Um valor menor para o erro parece uma melhor ideia. Se tomarmos um valor para o erro de 0,5 mm, os valores extremos de ℓ se tornariam mais razoáveis, pois não poderíamos afirmar com tanta certeza de que não se tratam de valores claramente distinguíveis em uma medida: $\ell - \delta\ell = 13,36$ cm e $\ell + \delta\ell = 13,46$ cm.

Um erro pequeno pode ser cometido na própria leitura dos valores devido à paralaxe (deslocamento aparente entre dois objetos localizados a distâncias diferentes do observador quando este se move). Isso é bastante notável em equipamentos analógicos em que a medida é mostrada por um ponteiro, pois quando o observador se desloca uma pequena distância para um lado ou outro, a posição aparente do ponteiro muda. Para evitar o erro de paralaxe, a medida deve ser feita de forma que o ponteiro seja observado diretamente de frente. Alguns aparelhos têm uma região espelhada atrás do ponteiro para eliminar esse tipo de erro, sendo que a lei-

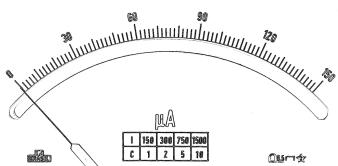


Figura 3.1: Para eliminar erros de leitura devidos à paralaxe, muitos equipamentos utilizam um espelho atrás do ponteiro (região curva abaixo da escala): quando a imagem do ponteiro no espelho está atrás do próprio ponteiro, temos certeza de que estamos vendo o ponteiro exatamente de frente, eliminando este tipo de erro.

tura correta é feita quando a imagem do ponteiro fica escondida atrás dele.

Em alguns equipamentos, a menor divisão da escala — o que denominamos como *resolução* do equipamento — pode ser muito grande. Nesse caso, temos mais facilidade em avaliar o algarismo estimado. Podemos então reduzir o valor do erro para $1/3$ ou $1/4$ da medida. No entanto isso não é muito comum, pois em geral os fabricantes dos equipamentos optam por divisões pequenas com o intuito de possibilitar a realização de medidas precisas. Nos equipamentos que utilizaremos no laboratório didático, as divisões são em geral pequenas e por isso adotaremos sempre que o erro é equivalente à metade da menor divisão da escala.

Equipamentos digitais ou dotados de escala auxiliar: Se, por outro lado, o equipamento for digital podemos realizar uma medida como $M = 14,2\text{ g}$, por exemplo. Se utilizássemos um equipamento mais preciso, talvez essa medida pudesse variar entre $14,15\text{ g}$ até $14,25\text{ g}$ (incluindo o primeiro valor, porém não incluindo o último) devido a arredondamentos realizados pelo equipamento em virtude do número reduzido de casas decimais. Outra possibilidade é a de que o equipamento simplesmente descarte dígitos menores que décimos de grama, o que permitiria que as medidas variassem entre $14,20\text{ g}$ e $14,29\text{ g}$. Poderíamos escolher para o erro do equipamento o valor de metade da menor divisão da escala abaixo do valor mostrado e de uma divisão acima. Por simplicidade, no entanto, assumimos que no caso de equipamentos digitais o erro é equivalente à menor divisão da escala tanto acima quanto abaixo do valor indicado.

Se o equipamento é dotado de uma escala auxiliar, verificamos que ao realizar a leitura em geral percebemos que duas ou três marcas parecem alinhadas com as marcas da escala principal. Se tormarmos a do meio, por exemplo, poderíamos considerar que a medida pode variar dentro do intervalo compreendido pelas marcas à esquerda e à direita. Logo, também adotamos para o erro a menor divisão da escala. Como tanto os equipamentos digitais, quanto os dotados de escala auxiliar possuem erros dados pela mesma regra, equipamentos desses dois tipos são comumente referidos coletivamente como *não-analógicos*.

3.4 Erros propagados

Se precisamos calcular a área de uma folha, é mais fácil realizar um cálculo através do produto das medidas de ambos os lados, que comparar com um “padrão de área”. Se temos um erro nas medidas das laterais, no entanto, deve haver um erro associado à medida da área.

Na Figura 3.3 mostramos o cálculo da área a partir de duas medidas ℓ_1 e ℓ_2 . Como cada uma dessas medidas possui um erro associado, denotados por $\delta\ell_1$ e $\delta\ell_2$, respectivamente, devemos calcular os valores máximos e mínimos da área:

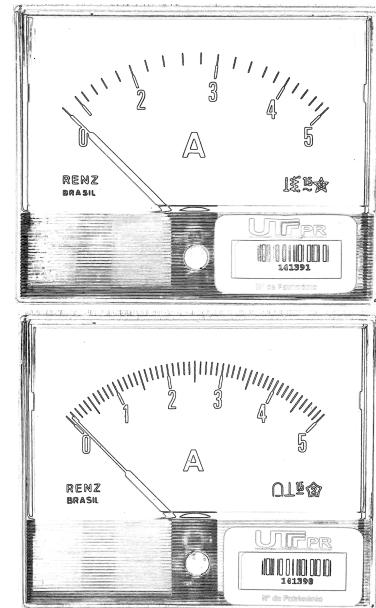


Figura 3.2: Dois equipamentos capazes de realizar medidas em um intervalo de zero a cinco ampéres. Note que a menor divisão da escala é menor no segundo caso.

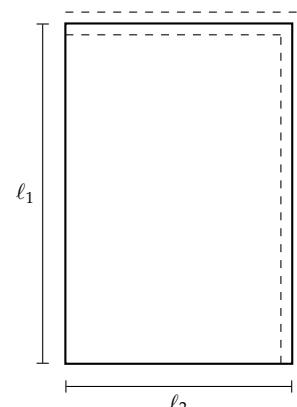


Figura 3.3: Erro no cálculo da área de um retângulo.

$$A_- = (\ell_1 - \delta\ell_1)(\ell_2 - \delta\ell_2) \quad (3.5)$$

$$= \ell_1\ell_2 - (\ell_1\delta\ell_2 + \ell_2\delta\ell_1 - \delta\ell_1\delta\ell_2) \quad (3.6)$$

$$A_+ = (\ell_1 + \delta\ell_1)(\ell_2 + \delta\ell_2) \quad (3.7)$$

$$= \ell_1\ell_2 + (\ell_1\delta\ell_2 + \ell_2\delta\ell_1 + \delta\ell_1\delta\ell_2). \quad (3.8)$$

Se desprezarmos o produto $\delta\ell_1\delta\ell_2$, que deve ser muito pequeno, já que os erros são — em geral — pequenas frações das medidas, podemos escrever as expressões acima como uma só:

$$A = \ell_1\ell_2 \pm (\ell_1\delta\ell_2 + \ell_2\delta\ell_1). \quad (3.9)$$

Temos então uma expressão para calcular o erro associado à área da folha.

A expressão acima, não está limitada ao cálculo de uma área, mas serve para qualquer multiplicação de dois números. Veremos adiante que podemos determinar um método geral para a obtenção do erro para qualquer expressão. A partir de tal método, é possível deduzir os resultados abaixo

$$(x \pm \delta x) + (y \pm \delta y) = (x + y) \pm (\delta x + \delta y) \quad (3.10a)$$

$$(x \pm \delta x) - (y \pm \delta y) = (x - y) \pm (\delta x + \delta y) \quad (3.10b)$$

$$(x \pm \delta x) \cdot (y \pm \delta y) = (x \cdot y) \pm (|x| \cdot \delta y + |y| \cdot \delta x) \quad (3.10c)$$

$$(x \pm \delta x) \div (y \pm \delta y) = (x \div y) \pm \frac{|x| \cdot \delta y + |y| \cdot \delta x}{y^2} \quad (3.10d)$$

$$(x \pm \delta x)^n = x^n \pm n \cdot x^{n-1} \cdot \delta x \quad (3.10e)$$

$$\ln(x \pm \delta x) = \ln x \pm \frac{\delta x}{x} \quad (3.10f)$$

$$\log(x \pm \delta x) = \log x \pm \frac{0,4343 \cdot \delta x}{x}. \quad (3.10g)$$

É importante observar, no entanto, que apesar de podermos calcular o erro propagado em uma operação complexa como uma sucessão de operações simples — como as do conjunto de equações acima — em geral esse erro é maior do que aquele que seria obtido se deduzíssemos a expressão para o erro a partir da expressão geral para o erro propagado.

Exemplos de cálculo de erro propagado

Vamos fazer agora alguns exemplos de operações envolvendo medidas. Para isso, vamos tomar duas medidas ℓ_1 e ℓ_2 , dadas por

$$\ell_1 = (13,24 \pm 0,05) \text{ cm} \quad (3.11)$$

$$\ell_2 = (11,14 \pm 0,05) \text{ cm}. \quad (3.12)$$

No caso de termos uma soma de tais medidas, temos — usando a Equação (3.10a) —

$$\ell_1 + \ell_2 = (13,24 \pm 0,05) \text{ cm} + (11,14 \pm 0,05) \text{ cm} \quad (3.13)$$

$$= ([13,24 + 11,14] \pm [0,05 + 0,05]) \text{ cm} \quad (3.14)$$

$$= (24,30 \pm 0,10) \text{ cm}. \quad (3.15)$$

De maneira similar, podemos calcular a diferença entre tais medidas através da Equação (3.10b):

$$\ell_1 - \ell_2 = (13,24 \pm 0,05) \text{ cm} - (11,14 \pm 0,05) \text{ cm} \quad (3.16)$$

$$= ([13,24 - 11,14] \pm [0,05 + 0,05]) \text{ cm} \quad (3.17)$$

$$= (13,24 \pm 0,10) \text{ cm}. \quad (3.18)$$

Note que apesar de estarmos realizando uma subtração, os erros são *somados*.

Para o cálculo de um produto, a determinação do erro utilizando a Equação (3.10c) é um pouco mais elaborada que no caso da soma ou subtração:

$$\ell_1 \ell_2 = (13,24 \pm 0,05) \text{ cm} \times (11,14 \pm 0,05) \text{ cm} \quad (3.19)$$

$$= ([13,24 \cdot 11,14] \pm [|13,24| \cdot 0,05 + |11,14| \cdot 0,05]) \text{ cm}^2 \quad (3.20)$$

$$= (147,493\,6 \pm 1,219) \text{ cm}^2 \quad (3.21)$$

$$= (147,5 \pm 1,2) \text{ cm}^2. \quad (3.22)$$

Veja que no cálculo acima realizamos todas as operações com toda a precisão disponível — isto é, utilizamos todos os dígitos da calculadora —, mas como último passo descartamos os dígitos cuja ordem de grandeza é menor que a do último algarismo significativo. Esse procedimento deve ser adotado em todos os cálculos envolvendo medidas.

O cálculo do erro na operação de divisão através da Equação (3.10d) é similar ao caso da multiplicação, porém envolve um passo a mais devido à divisão do erro pelo denominador:

$$\ell_1 \div \ell_2 = (13,24 \pm 0,05) \text{ cm} \div (11,14 \pm 0,05) \text{ cm} \quad (3.23)$$

$$= \left([13,24 \div 11,14] \pm \left[\frac{|13,24| \cdot 0,05 + |11,14| \cdot 0,05}{11,14^2} \right] \right) \quad (3.24)$$

$$= (1,188\,509\,874 \pm 0,009\,822\,755) \quad (3.25)$$

$$= (1,189 \pm 0,010). \quad (3.26)$$

Para a potencia, temos no caso geral a Expressão (3.10e). Tal equação deve ser particularizada para a potência em questão:

$$\ell_1^2 = [(13,24 \pm 0,05) \text{ cm}]^2 \quad (3.27)$$

$$= (13,24^2 \pm [2 \cdot 13,24^{(2-1)} \cdot 0,05]) \text{ cm}^2 \quad (3.28)$$

$$= (175,297\,6 \pm 1,324) \text{ cm}^2 \quad (3.29)$$

$$= (175,3 \pm 1,3) \text{ cm}^2. \quad (3.30)$$

Também podemos utilizar a Expressão (3.10e) para o cálculo de potências negativas. Para o caso $n = -1$ em especial, temos

$$\ell_1^{-1} = [(13,24 \pm 0,05) \text{ cm}]^{(-1)} \quad (3.31)$$

$$= (13,24^{(-1)} \pm [(-1) \cdot 13,24^{((-1)-1)} \cdot 0,05]) \text{ cm}^{-1} \quad (3.32)$$

$$= (0,075\,528\,701 \pm [13,24^{(-2)} \cdot 0,05]) \text{ cm}^{-1} \quad (3.33)$$

$$= (0,075\,528\,701 \pm 0,000\,285\,229) \text{ cm}^{-1} \quad (3.34)$$

$$= (0,075\,53 \pm 0,000\,3) \text{ cm}^{-1} \quad (3.35)$$

$$= (7,553 \pm 0,03) \cdot 10^{-2} \text{ cm}^{-1}. \quad (3.36)$$

As operações exemplificadas acima são as que aparecem com maior frequência em cálculos. Muitas vezes, no entanto, será necessário aplicar mais que uma fórmula. Se, por exemplo, precisamos determinar o resultado de uma expressão do tipo

$$R = \frac{\ell_1(\ell_2 - \ell_3)}{\ell_4}, \quad (3.37)$$

devemos separar o cálculo em etapas, calculando o erro em cada uma delas:

- Primeiro calculamos a diferença $d = \ell_2 - \ell_3$;
- Após isso, calculamos o produto $p = \ell_1 \cdot d$;
- Finalmente, determinamos razão $R = p/\ell_4$.

3.4.1 Constantes e erros propagados

No caso de termos operações envolvendo constantes como π , ou qualquer outro valor conhecido absolutamente (como 2, 3, 4, etc.) — isto é, que não são medidas —, podemos simplesmente efetuar a operação com a constante e o erro da mesma forma que com a medida. Por exemplo

$$r = (4,0 \pm 0,5) \text{ mm} \quad (3.38)$$

$$p = 2\pi r \quad (3.39)$$

$$= 2\pi(4,0 \pm 0,5) \text{ mm} \quad (3.40)$$

$$= (2\pi 4,0 \pm 2\pi 0,5) \text{ mm} \quad (3.41)$$

$$= (25 \pm 3) \text{ mm} \quad (3.42)$$

sempre respeitando o número de algarismos significativos e os critérios de arredondamento.

3.5 Erros e algarismos significativos

Verificamos que as medidas fornecidas por instrumentos são expressas por um conjunto de algarismos significativos e que algarismos além deles são mera especulação. Também utilizamos regras gerais para determinar o número de algarismos significativos de uma medida indireta com base no número de algarismos significativos das medidas diretas. Agora que conhecemos o erro, podemos entender a origem dos algarismos significativos de uma maneira simples: eles são os algarismos cuja ordem de grandeza é maior ou igual àquela do erro.

Para verificar como funciona esse processo, vejamos o seguinte conjunto de medidas:

$$v_0 = (10,3456 \pm 0,01) \text{ m/s} \quad (3.43)$$

$$a = (2,0658 \pm 0,05) \text{ m/s}^2 \quad (3.44)$$

$$t = (3,000 \pm 0,001) \text{ s.} \quad (3.45)$$

Utilizando essas informações e as fórmulas para o erro propagado, obtemos — utilizando a relação $v = v_0 + at$ — o seguinte resultado:

$$v = (16,543 \pm 0,162\,065\,8) \text{ m/s.} \quad (3.46)$$

O erro é sempre expresso com um ou dois algarismos significativos⁵. Nesse caso, o erro da medida acima pode ser expresso como $\delta v = 0,16$ m/s. Vemos também que a medida tem algarismos cuja ordem de grandeza é menor que o erro e são, portanto, sem significado. Podemos reduzir nossa medida para a velocidade a

$$v = (16,54 \pm 0,16) \text{ m/s.} \quad (3.47)$$

Analizando o erro das medidas mostradas nas Equações (3.43) a (3.45), percebemos que existem vários algarismos sem significado. Retirando-os, obtemos

$$v_0 = (10,35 \pm 0,01) \text{ m/s} \quad (3.48)$$

$$a = (2,07 \pm 0,05) \text{ m/s}^2 \quad (3.49)$$

$$t = (3,000 \pm 0,001) \text{ s.} \quad (3.50)$$

Verificamos agora que a medida para a aceleração a tem somente três algarismos significativos. Segundo a regra sobre o número de algarismos significativos para o resultado de uma multiplicação, devemos manter então somente três algarismos. Ao somarmos com o valor de v_0 , a regra nos diz para mantermos duas casas após a vírgula. De fato, isto nos dá um resultado que coincide com aquele obtido através da análise do erro propagado (Equação (3.47)).

3.6 Incerteza fracional e percentual

Se realizamos uma medição com um instrumento e obtemos $\ell_1 = (15,3 \pm 0,5)$ cm, o erro é de aproximadamente 3,3%. Se realizarmos outra medição com o mesmo instrumento e obtivermos $\ell_2 = (3,4 \pm 0,5)$ cm, teremos um erro de aproximadamente 14,7%. Claramente no segundo caso temos uma medida mais incerta que no primeiro, o que acarretará em consequências para o cálculo de medidas indiretas.

Para calcularmos o erro como uma fração da medida, basta o dividirmos pelo valor da medida:

$$E_f = \frac{\delta x}{x}. \quad (3.51)$$

Como x e δx possuem a mesma unidade, o erro fracional é adimensional. O erro percentual pode ser calculado multiplicando-se o erro fracional por 100:

$$E\% = 100 \cdot E_f. \quad (3.52)$$

É comum encontrar dispositivos eletrônicos cujo erro é dado como um número percentual. Por exemplo, podemos ter um resistor cuja resistência R é de 500Ω , com erro de 5 %. Isso significa que a medida da resistência é $R = (500 \pm 25) \Omega$, ou melhor, $R = (5,0 \pm 0,3) \cdot 10^2 \Omega$.

⁵ Lembre-se que utilizamos dois se o primeiro algarismo significativo do erro, isto é, o primeiro dígito diferente de zero, for 1; nos demais casos utilizamos somente um algarismo significativo.

Outro uso comum do erro percentual é ao se declarar a precisão de um instrumento de medida. Se um voltímetro declara sua precisão como 1 %, isso significa que em uma medida $V_1 = 13,45\text{ V}$ temos um erro $\delta V_1 = 0,13\text{ V}$. Já em uma medida $V_2 = 156,35\text{ V}$, temos um erro $\delta V_2 = 1,6\text{ V}$. Temos, portanto, um caso em que o erro da medida — também chamado de *erro absoluto* — varia, mas o erro percentual é constante, indicando que o instrumento é igualmente adequado (ou inadequado, dependendo de sua necessidade de precisão) para uma ampla faixa de valores de medida.

Os erros fracional e percentual nos indicam que sempre que desejarmos conhecer uma medida calculada a partir de outras, devemos procurar utilizar medidas diretas com um grande número de algarismos significativos, de forma a minimizar o erro percentual. Por exemplo, se calcularmos o valor da aceleração da gravidade através de

$$g = \frac{2\Delta x}{t^2}, \quad (3.53)$$

a partir das medidas

$$t_1 = (0,15 \pm 0,01) \text{ s} \quad (3.54)$$

$$\Delta x_1 = (0,11 \pm 0,02) \text{ m} \quad (3.55)$$

e

$$t_2 = (1,32 \pm 0,01) \text{ s} \quad (3.56)$$

$$\Delta x_2 = (8,54 \pm 0,02) \text{ m}, \quad (3.57)$$

obteremos os valores

$$g_1 = (9,8 \pm 2) \text{ m/s}^2 \quad (3.58)$$

$$g_2 = (9,80 \pm 0,1) \text{ m/s}^2. \quad (3.59)$$

Claramente as medidas diretas têm o mesmo erro absoluto, no entanto erros fracionais/percentuais diferentes. Isso se reflete na incerteza da medida indireta, onde no segundo caso obtemos um erro muito menor, devido ao menor erro fracional/percentual.

3.6.1 Erro percentual em relação a um valor de referência

Em experiências didáticas, é muito comum que estejamos interessados em determinar o valor de uma constante física cujo valor já é conhecido experimentalmente com grande precisão. Nesses casos, é interessante obter um valor percentual de diferença entre o valor obtido e o valor de referência. Tal valor também é conhecido como erro percentual, e pode ser calculado através da expressão

$$E_{\%} = \left| \frac{x - x_{\text{ref}}}{x_{\text{ref}}} \right| \cdot 100, \quad (3.60)$$

onde x representa o valor que obtemos experimentalmente e x_{ref} representa o valor de referência.

3.7 Expressão geral para o cálculo do erro propagado

Apesar de termos conseguido calcular o erro propagado de uma maneira relativamente simples para o caso do produto de duas medidas, precisamos de um método mais robusto, que possa ser aplicado a *qualquer tipo de função*. Se tivermos uma medida q , dada por $q = f(x, y, z, \dots, \xi, \dots)$, onde $x, y, z, \dots, \xi, \dots$ representam medidas diretas através das quais calculamos a medida indireta q , podemos calcular uma variação em q em relação a uma variação em uma das medidas — na medida ξ , por exemplo — através de uma derivada:

$$\frac{dq}{d\xi} = \frac{df(x, y, z, \dots, \xi, \dots)}{d\xi}. \quad (3.61)$$

Podemos então escrever a variação dq como

$$dq = \left(\frac{df(x, y, z, \dots, \xi, \dots)}{d\xi} \right) d\xi. \quad (3.62)$$

Assumindo que as variáveis x, y, z, \dots, ξ são todas independentes, podemos escrever a expressão acima como

$$dq = \left(\frac{\partial f(x, y, z, \dots, \xi)}{\partial \xi} \right) d\xi. \quad (3.63)$$

Agora podemos identificar as variações $d\xi$ e dq na expressão acima com próprios erros nas medidas. Logo, a contribuição para o erro em q devido ao erro $\delta\xi$ é dada por

$$\delta q = \left(\frac{\partial f(x, y, z, \dots, \xi)}{\partial \xi} \right) \delta \xi. \quad (3.64)$$

Cada uma das medidas dá origem a um termo análogo à expressão acima. Somando todas essas contribuições, obtemos

$$\delta q = \left| \frac{\partial f}{\partial x} \right| \delta x + \left| \frac{\partial f}{\partial y} \right| \delta y + \left| \frac{\partial f}{\partial z} \right| \delta z + \dots + \left| \frac{\partial f}{\partial \xi} \right| \delta \xi, \quad (3.65)$$

onde tomamos o valor absoluto da derivada parcial para eliminar possíveis “compensações” devido a sinais diferentes para cada termo.

A partir da equação acima, podemos calcular o erro para qualquer função que nos dê uma medida indireta. Se, por exemplo, considerarmos a área de um retângulo

$$A = f(\ell_1, \ell_2) = \ell_1 \ell_2, \quad (3.66)$$

temos:

$$\delta A = \left| \frac{\partial(\ell_1 \ell_2)}{\partial \ell_1} \right| \delta \ell_1 + \left| \frac{\partial(\ell_1 \ell_2)}{\partial \ell_2} \right| \delta \ell_2 \quad (3.67)$$

$$= |\ell_2| \delta \ell_1 + |\ell_1| \delta \ell_2, \quad (3.68)$$

que é exatamente a expressão que encontramos quando analisamos os valores máximo e mínimo para a área do retângulo.

4 Regressão Linear

Apesar de podermos verificar previsões teóricas pela simples comparação com os dados experimentais obtidos (assumindo que eles sejam confiáveis), devido à dispersão dos dados não temos um bom método para extrair informações a partir das medidas. Veremos que para isso precisamos determinar a linha de tendência dos dados. A partir das informações para essa linha, conseguiremos extrair informações acerca de parâmetros físicos do sistema.

4.1 Linhas de Tendência

Quando realizamos um experimento, procuramos relacionar uma variável dependente a uma variável independente. Para visualizarmos a relação entre as duas, é interessante fazer uma representação gráfica da variável dependente em função dos valores da variável independente. Podemos assim verificar uma tendência geral dos pontos, que pode seguir padrões retilíneos, parabólicos, etc. Retomando a citação ao texto de Johann H. Lambert (e a extendendo), temos¹

Se as observações experimentais fossem completamente precisas, essas ordenadas resultariam em um número de pontos através dos quais uma curva ou uma reta deveriam ser traçadas. No entanto, esse não é o caso, a curva/reta desvia pouco ou muito dos pontos observados. Portanto, ela deve ser traçada de maneira que passe tão próxima quanto possível das posições verdadeiras e vá, como se fosse, pelo meio dos pontos em questão.

Muitas vezes tal padrão é muito claro, pois os pontos tem uma dispersão baixa. Outras vezes a dispersão é razoavelmente alta e fica difícil verificar o padrão seguido pelos pontos.

Mesmo em casos em que podemos verificar um padrão aparente ao fazer um gráfico, determinar a forma mais adequada para a *linha de tendência* que melhor descreve os pontos experimentais — ou mesmo afirmar que tais pontos seguem este padrão — pode ser complicado. Se, por exemplo, fizermos uma série de medidas que seguem um padrão parabólico, mas com medidas que se restringem a um intervalo pequeno da variável independente, o gráfico terá a aparência de uma reta (veja as Figuras 4.1 e 4.2).

Determinar o padrão seguido pelos pontos, é, portanto, uma tarefa que não pode ser feita a partir de um gráfico: o mais adequado é termos uma *teoria acerca do fenômeno físico* que descreva qual é o padrão que os pontos devem seguir, e usar um gráfico para determinar se tal descrição é coerente. Verificaremos posteriormente como determinar se uma teoria é plausível ou não, por hora vamos nos preocupar em determinar a *melhor reta* que ajusta um conjunto de dados.

¹Johann Heinrich Lambert. "Beyträge zum Gebrauche der Mathematik und deren Anwendung". Em: Edward R. Tufte. *The Visual Display of Quantitative Information*. Cheshire, Connecticut: Graphics Press, 2001, p. 45. ISBN: 0-9613921-4-2

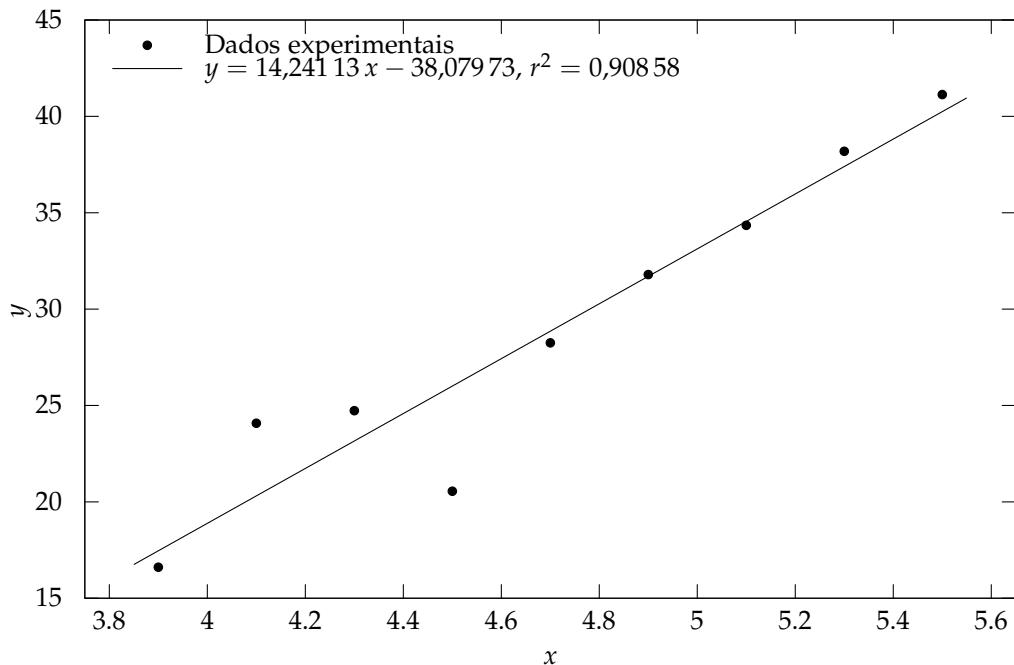


Figura 4.1: Gráfico de um conjunto de pontos que aparentemente seguem uma tendência linear. Veja também a Figura 4.2.

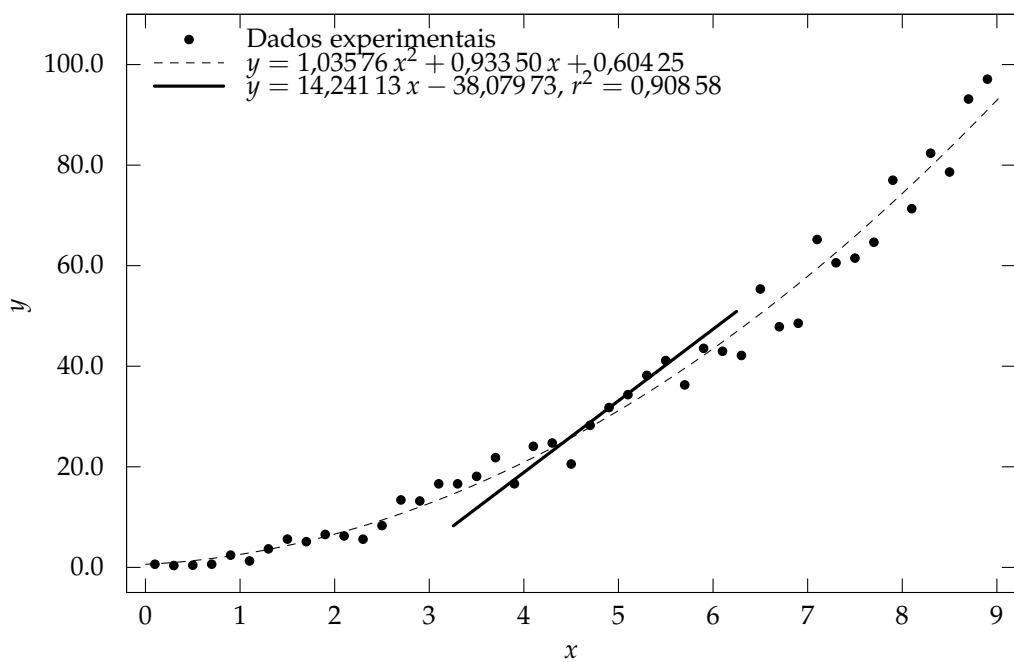


Figura 4.2: Gráfico do mesmo conjunto de pontos da Figura 4.1, juntamente com diversos outros pertencentes ao mesmo conjunto de dados. Verifique que a tendência linear aparente no primeiro gráfico já não é mais razoável. De fato, os dados correspondem a uma distribuição em torno de uma parábola.

Existem outros tipos de regressão, como a logarítmica ou exponencial, ou mesmo processos capazes de calcular os coeficientes para uma equação com uma forma qualquer. No entanto, nos restringiremos ao caso linear devido ao fato de que a maioria das calculadoras científicas é capaz de realizar tal processo. Além disso, uma vez conhecida a equação da reta, adicioná-la ao gráfico dos dados experimentais é uma questão de calcular dois pontos e traçar uma reta com uma régua.

4.2 Regressão Linear

Sempre que tivermos um conjunto de dados, podemos calcular a melhor reta que o representa através de um processo de *regressão linear*. Este processo consiste em aplicar um método matemático que tome os dados experimentais e calcule os coeficientes linear A e angular B para a equação da reta:

$$y = A + Bx. \quad (4.1)$$

A dimensão do coeficiente linear é a mesma que a da variável dependente y — ou seja, é a mesma que do eixo y em um gráfico $y \times x$ —, enquanto a dimensão do coeficiente angular é a mesma que a da razão entre a dimensão da variável dependente pela dimensão da variável independente — isto é, é a razão entre a dimensão do eixo y e a dimensão do eixo x em um gráfico $y \times x$.

O método utilizado para obter tais coeficientes é o de *mínimos quadrados*. Nele, são encontrados os coeficientes de forma a minimizar o quadrado da distância entre os pontos experimentais e a “melhor reta”. É possível mostrar², utilizando técnicas de cálculo, que para minimizarmos a soma do quadrado das distâncias entre os pontos e a melhor reta, os coeficientes linear e angular são dados por

$$A = \frac{\sum x_i^2 \sum y_i - \sum x_i \sum x_i y_i}{N \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \quad (4.2)$$

$$B = \frac{N \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{N \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2}. \quad (4.3)$$

onde as somas se dão sobre todas as medidas x_i e y_i , N representa o número de medidas, e as médias das medidas para as variáveis x e y são representadas por $\langle x \rangle$ e $\langle y \rangle$, respectivamente. É importante lembrar que as relações acima são válidas somente para o caso em que os erros associados às medidas de x e y são constantes, isto é, a incerteza δx para as medidas de x são todas iguais, assim como a incerteza δy para as medidas de y . Após fazer a regressão, podemos utilizar os coeficientes para traçar as *retas de tendência* nos gráficos³.

Ao fazermos o processo de regressão linear, a calculadora também calculará o *coeficiente de correlação linear* r , dado por

$$r = \frac{\sum (x_i - \langle x \rangle)(y_i - \langle y \rangle)}{\sqrt{\sum (x_i - \langle x \rangle)^2 \sum (y_i - \langle y \rangle)^2}}. \quad (4.4)$$

Tal coeficiente pode ser interpretado como um “índice de confiança” e geralmente é calculado ao quadrado, pois seus valores podem variar

² John R. Taylor. *An Introduction to Error Analysis*. 2nd Edition. University Science Books, 1997. ISBN: 0-935702-75-X

³ Quando tais retas forem calculadas, adicione as equações resultantes aos gráficos.

x	y_1	y_2	y_3
0,714	14,577	0,678	1,235
2,693	20,696	8,806	-0,153
4,389	25,226	20,988	-0,657
4,960	27,449	28,474	-0,592
6,245	30,242	40,030	0,961
7,277	33,378	55,780	1,149
7,579	34,195	64,904	1,635
7,719	35,715	64,394	1,476
7,912	35,011	66,412	1,739
8,280	37,529	74,632	1,249
9,034	40,590	87,455	0,200
9,442	39,156	94,785	0,146
10,306	43,238	113,030	-0,231
10,572	42,406	111,970	-0,575
11,177	44,796	129,481	0,121
15,335	57,611	235,805	0,446
17,023	63,832	294,533	-0,780
18,926	68,063	372,048	0,500
20,608	74,408	426,581	1,118
20,876	75,083	456,391	1,065
21,095	75,248	452,660	1,085
22,225	77,243	507,765	0,271
22,407	81,058	509,275	-0,230
22,469	78,821	521,414	0,394
23,077	80,714	554,175	-0,198
26,421	91,433	700,788	1,869
26,863	91,777	732,601	1,724
27,360	93,291	773,226	1,452

Tabela 4.1: Dados de três variáveis (y_1 , y_2 e y_3) em função de uma quarta (x).

entre -1 e 1 . Quanto mais próximo r for de ± 1 , menor é a dispersão dos pontos em relação ao comportamento retilíneo, ou seja, maiores são as chances de que o fenômeno estudado e que deu origem aos dados siga uma relação linear. Este número geralmente se parece com algo como $r^2 = 0,999\,98$, $r^2 = 0,997$, $r^2 = 0,990$, etc., quando os dados são altamente lineares e relativamente abundantes. Se a dispersão em relação ao comportamento linear for grande e forem poucos os pontos, r^2 pode cair para $0,7$, ou valores menores.

Régressão linear e linearidade

Um aspecto importante a ser considerado é se os dados realmente seguem uma tendência linear: uma distribuição qualquer de pontos, mesmo que visivelmente não linear, pode ser descrita por uma melhor reta. Caso a tendência não seja linear, o coeficiente r^2 resultará um valor baixo. Nas Figuras 4.3 a 4.5 mostramos três conjuntos de dados distintos juntamente com suas respectivas melhores retas e coeficientes de dispersão r^2 . Os dados foram gerados utilizando as expressões $y_1 = A + B(x + r_1) + r_2$, $y_2 = A(r_1 + x)^2 + B + r_2$ e $y_3 = A \operatorname{sen}(x + r_1) + B + r_2$, onde r_1 e r_2 são números aleatórios entre zero e um, enquanto A e B representam constantes arbitrárias — veja a Tabela 4.2 —. Verificamos que nos três casos podemos calcular uma melhor reta, ainda que para y_2 e y_3 o comportamento não seja linear.

Dentre as três figuras, a Figura 4.4 se destaca. Nesse caso, temos um comportamento não linear, porém verificamos que o valor do coeficiente r^2 é relativamente alto. Ocorre que o comportamento dos dados sofre uma distorção relativamente pequena — apesar de visivelmente não linear — em relação a um comportamento linear e por isso obtemos um valor grande para o coeficiente de dispersão. Muitas vezes um comportamento verdadeiramente linear pode apresentar uma distorção pequena como esta, porém devido a flutuações aleatórias, e não devido à não-lineariedade. A distinção entre essas duas possibilidades pode ser feita realizando mais medidas: Se o comportamento for verdadeiramente linear, o valor de r^2 tenderá a crescer, enquanto no caso de termos um comportamento não-linear, o valor desse coeficiente deve permanecer constante, ou diminuir.

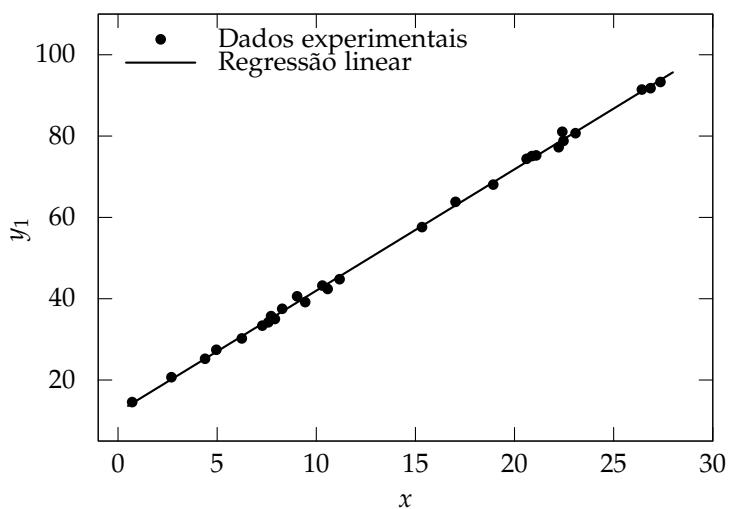


Figura 4.3: Conjunto de dados 1. A reta da regressão linear é dada por $y(x) = 2,984\,480\,401x + 12,140\,462\,64$, $r^2 = 0,998\,901\,256$.

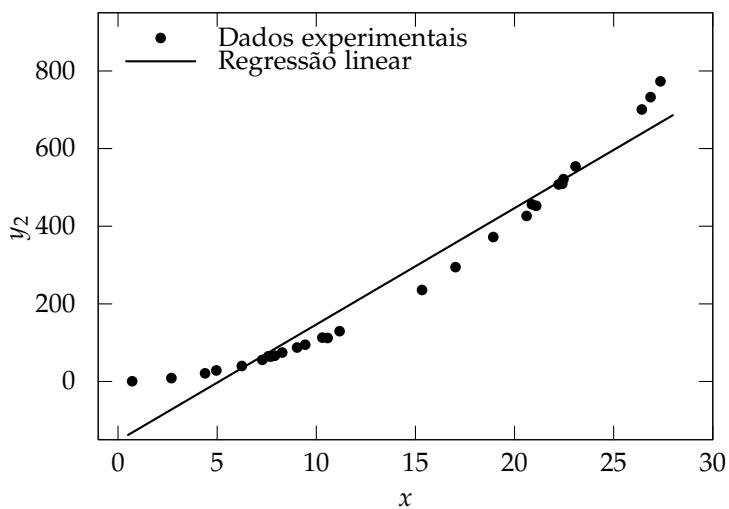


Figura 4.4: Conjunto de dados 2. A reta da regressão linear é dada por $y(x) = 29,978\,230\,68x - 152,924\,429$, $r^2 = 0,956\,577\,278$.

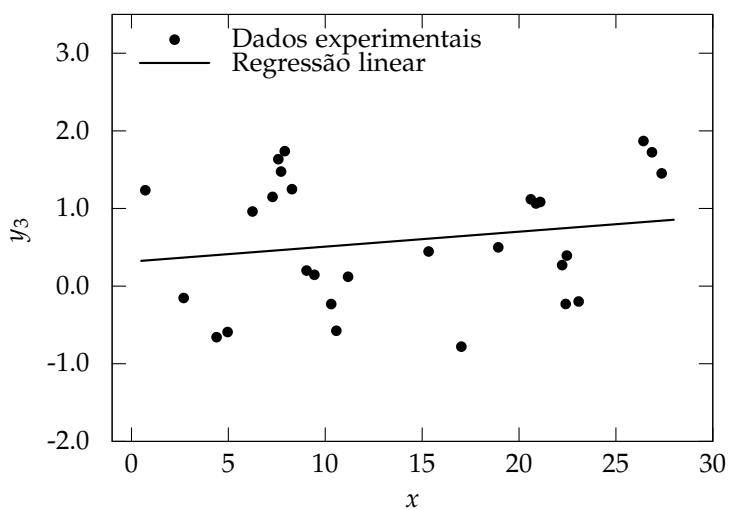


Figura 4.5: Conjunto de dados 3. A reta da regressão linear é dada por $y(x) = 0,019\,262\,681x + 0,316\,038\,383$, $r^2 = 0,035\,985\,674$.

Exemplo: Cálculo dos coeficientes da regressão linear

Para determinarmos os valores das constantes A , B , e do coeficiente r^2 é necessário calcularmos uma série de valores intermediários. Na Tabela 4.2 (página 53) apresentamos tais valores intermediários para o caso do cálculo dos coeficientes da regressão linear para a variável y_1 discutida acima. Através desses valores, obtemos para o coeficiente linear

$$A = \frac{\sum x_i^2 \sum y_i - \sum x_i \sum x_i y_i}{N \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \quad (4.5)$$

$$= \frac{7\,295,757 \cdot 1\,512,768 - 392,984 \cdot 26\,545,051}{28 \cdot 7\,295,757 - 392,984^2} \quad (4.6)$$

$$= 12,140\,462\,64. \quad (4.7)$$

Para o coeficiente angular, obtemos

$$B = \frac{N \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{N \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \quad (4.8)$$

$$= \frac{28 \cdot 26\,545,051 - 392,984 \cdot 1\,512,786}{28 \cdot 7\,295,757 - 392,984^2} \quad (4.9)$$

$$= 2,984\,480\,401. \quad (4.10)$$

Finalmente, para o coeficiente r obtemos

$$r = \frac{\sum (x_i - \langle x \rangle)(y_i - \langle y \rangle)}{\sqrt{\sum (x_i - \langle x \rangle)^2 \sum (y_i - \langle y \rangle)^2}} \quad (4.11)$$

$$= \frac{5\,312,883}{\sqrt{1\,780,170 \cdot 15873,637}} \quad (4.12)$$

$$= 0,999\,450\,477, \quad (4.13)$$

o que resulta em um r^2 dado por

$$r^2 = 0,998\,901\,256. \quad (4.14)$$

Note que o cálculo é bastante trabalhoso se for realizado manualmente. Felizmente, esse tipo de análise — a regressão linear — é algo que é implementado na maioria dos programas de computador que permitem a análise de dados. Mesmo em planilhas de cálculo existem funções que permitem calcular as constantes A e B , e o coeficiente r^2 facilmente. Funções para a determinação de tais valores também estão disponíveis em calculadoras científicas. Na seção seguinte verificaremos como proceder para inserir os dados experimentais e obter os coeficientes da regressão linear para alguns modelos comuns de calculadoras.

i	x_i	$y_{1,i}$	x_i^2	$x_i y_i$	$x_i - \langle x \rangle$	$y_i - \langle y \rangle$	$(x_i - \langle x \rangle)^2$	$(y_i - \langle y \rangle)^2$	$(x_i - \langle x \rangle)(y_i - \langle y \rangle)$
1	0,714	14,577	0,510	10,408	-13,321	-39,451	177,453	1 556,387	525,533
2	2,693	20,696	7,252	55,734	-11,342	-33,332	128,644	1 111,027	378,057
3	4,389	25,226	19,263	110,717	-9,646	-28,802	93,048	829,559	277,828
4	4,960	27,449	24,602	136,147	-9,075	-26,579	82,358	706,447	241,208
5	6,245	30,242	39,000	188,861	-7,790	-23,786	60,686	565,777	185,296
6	7,277	33,378	52,955	242,892	-6,758	-20,650	45,672	426,425	139,556
7	7,579	34,195	57,441	259,164	-6,456	-19,833	41,682	393,351	128,045
8	7,719	35,715	59,583	275,684	-6,316	-18,313	39,894	335,369	115,667
9	7,912	35,011	62,600	277,007	-6,123	-19,017	37,493	361,649	116,444
10	8,280	37,529	68,558	310,740	-5,755	-16,499	33,122	272,219	94,955
11	9,034	40,590	81,613	366,690	-5,001	-13,438	25,011 4	180,582	67,206
12	9,442	39,156	89,151	369,711	-4,593	-14,872	21,097	221,179	68,310
13	10,306	43,238	106,214	445,611	-3,729	-10,790	13,907	116,426	40,238
14	10,572	42,406	111,767	448,316	-3,463	-11,622	11,993	135,073	40,249
15	11,177	44,796	124,925	500,685	-2,858	-9,232	8,169	85,231	26,387
16	15,335	57,611	235,162	883,465	1,300	3,583	1,690	12,837	4,657
17	17,023	63,832	289,783	1 086,612	2,988	9,804	8,927	96,117	29,293
18	18,926	68,063	358,193	1 288,160	4,891	14,035	23,920	196,979	68,643
19	20,608	74,408	424,690	1 533,400	6,573	20,380	43,202	415,341	133,954
20	20,876	75,083	435,807	1 567,433	6,841	21,055	46,797	443,310	144,033
21	21,095	75,248	444,999	1 587,357	7,060	21,220	49,842	450,285	149,809
22	22,225	77,243	493,951	1 716,726	8,190	23,215	67,074	538,933	190,126
23	22,407	81,058	502,074	1 816,267	8,372	27,030	70,088	730,617	226,290
24	22,469	78,821	504,856	1 771,029	8,434	24,793	71,130	614,689	209,100
25	23,077	80,714	532,548	1 862,637	9,042	26,686	81,755	712,139	241,290
26	26,421	91,433	698,069	2 415,751	12,386	37,405	153,409	1 399,129	463,292
27	26,863	91,777	721,621	2 465,406	12,828	37,749	164,554	1 424,982	484,237
28	27,360	93,291	748,570	2 552,442	13,325	39,263	177,552	1 541,578	523,172
Σ	392,984	1 512,786	7 295,757	26 545,051	0	0	1 780,170	15 873,637	5 312,883
$\langle \cdot \rangle$	14,035	54,028							

Tabela 4.2: Tabela de cálculos para a determinação das constantes A e B , e do coeficiente r^2 . As linhas marcadas com Σ e $\langle \cdot \rangle$ denotam as somas e as médias dos valores apresentados para cada variável, respectivamente. Os valores apresentados na tabela foram limitados a três casas após a vírgula, porém os cálculos foram feitos com toda a precisão disponível.

4.2.1 Regressão linear utilizando uma calculadora

Geralmente calculadoras científicas são capazes de realizar regressões lineares e diversas outras, facilitando a obtenção da melhor reta. Apresentaremos abaixo como realizar tal cálculo em alguns modelos.

CASIO® fx-82TL

- Pressione o botão **[MODE]**. As informações abaixo aparecerão no visor:

COMP	SD	REG
1	2	3

- Pressione o botão **[3]**. Teremos no visor

Lin	Log	Exp	→
1	2	3	

Ao pressionarmos o botão **[1]**, a calculadora estará no modo de regressão linear, indicado por **REG** no visor.

- Podemos agora digitar o valor da variável independente x_1 , correspondente ao primeiro ponto, seguido do botão **[,]**. Digitamos após a vírgula o valor da variável dependente y_1 correspondente ao primeiro ponto. Após isso, basta pressionar **[M+]** para inserir o par de valores na memória da calculadora. Repetiremos esse processo para cada par x_i, y_i .
- Quando todos os valores tiverem sido inseridos, podemos recuperar os valores de A , B e r pressionando **[SHIFT]** seguido de
 - tecla **[7]** e então **[=]** para recuperar o valor de A ;
 - tecla **[8]** e então **[=]** para recuperar o valor de B ;
 - tecla **[0]** e então **[=]** para recuperar o valor de r .

Para recuperar outro valor, não é necessário inserir os pontos novamente, basta pressionar mais uma vez **[SHIFT]** seguido da tecla correspondente à variável que desejamos.

- Para realizar uma nova regressão, devemos antes apagar os dados da regressão anterior. Fazemos isso pressionando **[SHIFT]** e então **[AC/ON]** (função **Scl**). Na tela aparecerá **Scl**. Pressione **[=]** para confirmar a exclusão dos dados.

CASIO® fx-82MS

- Pressione o botão **[MODE]**. As informações abaixo aparecerão no visor:

COMP	SD	REG
1	2	3

- Pressione o botão **[3]**. Teremos no visor

Lin	Log	Exp	→
1	2	3	

Ao pressionarmos o botão **[1]**, a calculadora estará no modo de regressão linear, indicado por REG no visor.

- Podemos agora digitar o valor da variável independente x_1 , correspondente ao primeiro ponto, seguido do botão **,**. Digitamos após a vírgula o valor da variável dependente y_1 correspondente ao primeiro ponto. Após isso, basta pressionar **[M+]** para inserir o par de valores na memória da calculadora. Repetiremos esse processo para cada par x_i, y_i .
- Quando todos os valores tiverem sido inseridos, podemos recuperar os valores de A , B e r pressionando **SHIFT** seguido do botão **[2]** (função S-var). Neste momento, aparecerá na tela

\bar{x}	$x\sigma n$	$x\sigma n - 1$	→
1	2	3	

Se pressionarmos para a direita no botão direcional duas vezes, na tela teremos

A	B	r
1	2	3

Basta agora escolher qual variável desejamos, pressionar o botão correspondente — **[1]**, **[2]** ou **[3]** — e pressionar **=**. Para recuperar outro valor, não é necessário inserir os pontos novamente, basta pressionar mais uma vez **SHIFT** seguido de **[2]** (função S-var) e escolher outra variável.

- Para realizar uma nova regressão, devemos antes apagar os dados da regressão anterior. Fazemos isso pressionando **SHIFT** e então **[MODE]** (função CLR). Na tela aparecerá

Scl	Mode	All
1	2	3

Selecione **Scl** pressionando o botão **[1]** e pressione **=**.

CASIO® fx-570ES e fx-991ES Plus

- Ao pressionar a tecla **[MODE]**, aparecerão diversas opções, entre elas a opção '3: STAT'. Pressione a tecla **[3]** para selecioná-la. Uma nova tela aparecerá com opções.
- Selecione a opção '2: A+Bx' pressionando a tecla **[2]**. Ao selecionar esta opção, uma tabela surgirá para a entrada de dados.
- Coloque o valor da abscissa x_1 da primeira medida e pressione **=**. A calculadora passará ao próximo valor de abscissa automaticamente, o que torna mais fácil a entrada de todos os valores para

essa variável. Ao finalizar, navegue usando as teclas direcionais até o local de inserção da primeira ordenada. Insira o valor e tecle $=$. A calculadora passará automaticamente ao próximo campo, permitindo a inserção do próximo valor de ordenada. Como a calculadora tem o comportamento automático de passar ao próximo valor da mesma variável, é mais fácil segui-lo, porém podemos inserir os pares x, y se utilizarmos as teclas direcionais após pressionar $=$. Qualquer erro pode ser corrigido navegando novamente ao campo e reinserindo os valores.

- Após inserir todos os valores, pressione a tecla **AC**.
- Para recuperar os valores de A , B , e r , devemos pressionar a tecla **SHIFT**, seguida da tecla **1** (função STAT). Uma nova tela de opções surgirá.
- No modelo *fx-570ES* devemos selecionar a opção '7: Reg' pressionando a tecla **7**. No modelo *fx-991ES Plus*, devemos pressionar a tecla **5** (opção '5: Reg'). Uma tela surgirá com as opções correspondentes às variáveis A , B e r . Selecione a variável que deseja recuperar através das teclas numéricas correspondentes e então pressione $=$. Para recuperar outra variável, basta repetir os passos desse ítem, não sendo necessário digitar novamente os dados experimentais.
- Para realizar uma nova regressão, basta repetirmos os passos desde o início. Quando a tabela de inserção de dados surgir, ela estará vazia.

4.2.2 Interpretação dos coeficientes

A ideia por trás do cálculo da melhor reta é estabelecer quais seriam os coeficientes mais adequados para uma relação linear que descreve o fenômeno estudado. *Esses coeficientes são importantes pois estão, em geral, ligados a constantes físicas cujo valor estamos interessados em medir.* Além disso, esse processo é mais preciso do que simplesmente calcular o valor dos coeficientes da reta associados aos pontos medidos e depois fazer uma média.

Vamos considerar, por exemplo, o conjunto de dados para a velocidade em função do tempo dados na Tabela 4.3, representados na Figura 4.6. Verificamos nos dados da tabela que a velocidade se altera com o tempo. Supondo que tenhamos um movimento com aceleração constante, podemos descrever os dados em função do tempo como

$$v = v_0 + at. \quad (4.15)$$

Comparando esta equação com a equação da reta $y = A + Bx$, verifi-

$(t \pm 0,01) \text{ s}$	$(v \pm 0,01) \text{ m/s}$
0,10	24,04
0,20	25,14
0,30	25,79
0,40	27,08
0,50	27,33
0,60	28,79
0,70	29,98
0,80	30,61
0,90	31,15
1,00	32,94
1,10	34,04
1,20	34,78
1,30	35,22
1,40	36,10
1,50	37,91

Tabela 4.3: Dados medidos para a velocidade em função do tempo para um experimento hipotético.

camos as relações

$$y = v \quad (4.16)$$

$$A = v_0 \quad (4.17)$$

$$B = a \quad (4.18)$$

$$x = t. \quad (4.19)$$

Para determinar a relação entre as variáveis das duas equações, devemos verificar qual variável dos dados foi varrida arbitrariamente — e que então deve corresponder à variável independente x — e qual foi lida em resposta à primeira — correspondendo à variável dependente y . Vemos na Tabela 4.3 que os valores de tempo são mais condizentes com uma variação arbitrária (valores “redondos” ou semi-inteiros, isto é, variados com um passo regular) do que no caso dos valores da velocidade. No caso de realizarmos um experimento, não teremos problemas em determinar quem foi a variável independente, pois realizaremos essa escolha ao idealizá-lo.

Dessa forma, se tomarmos os dados e realizarmos uma regressão linear, vamos obter os valores de v_0 e de a — que são desconhecidos — através das constantes A e B . Para os valores da tabela obtemos $v_0 = 22,734\,285\,714\,3$ e $a = 9,907\,142\,857\,1$. Verificaremos adiante que nem todos os dígitos obtidos para as constantes A e B são relevantes e por isso deveremos descartar alguns deles. Por ora podemos expressá-las com o mesmo número de casas após a vírgula que a variável (x ou y) que tem menos casas após a vírgula:

$$A = v_0 = 22,73 \text{ m/s} \quad (4.20)$$

$$B = a = 9,91 \text{ m/s}^2. \quad (4.21)$$

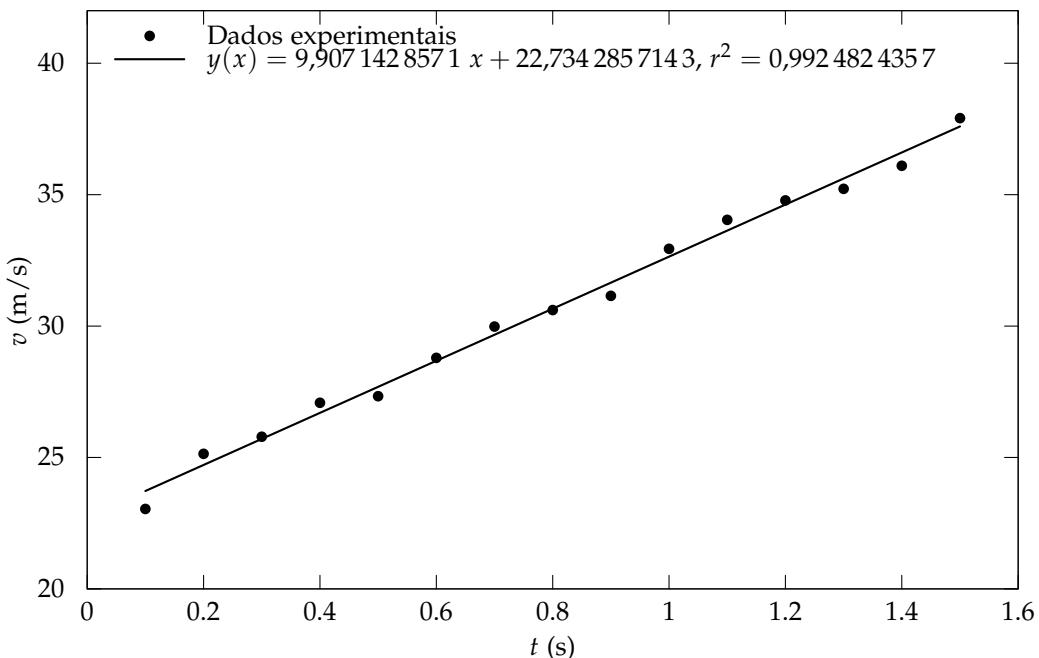


Figura 4.6: Gráfico dos dados da Tabela 4.3.

4.3 Linearização

É comum realizarmos um experimento e obtermos um conjunto de dados que não segue uma tendência linear. Em um experimento de queda livre, por exemplo, a distância percorrida pelo objeto que cai está ligada ao tempo através de

$$\Delta y = v_0^y t + \frac{a_y t^2}{2}. \quad (4.22)$$

Como em geral estamos interessados em extrair dos dados experimentais informações acerca de constantes físicas, podemos recorrer a um processo de regressão. No entanto, não podemos utilizar uma regressão linear neste caso, pois os dados claramente não seguirão uma tendência linear. Podemos recorrer a uma regressão quadrática ou realizar uma *linearização*.

Realizar uma linearização nada mais é do que fazer uma mudança de variáveis. No entanto, nem todos os casos são passíveis de serem linearizados. No caso da queda livre, por exemplo, precisamos garantir que v_0 seja muito próximo de zero. Nesse caso, podemos escrever

$$\Delta y = \frac{a_y t^2}{2}. \quad (4.23)$$

Fazendo agora a mudança de variáveis $\tau = t^2$, obtemos

$$\Delta y = \frac{a_y}{2} \tau. \quad (4.24)$$

Comparando a equação acima com a equação da reta $y = A + Bx$, verificamos as seguintes relações, se considerarmos que o tempo é a variável independente:⁴

$$y = \Delta y \quad (4.25)$$

$$A = 0 \quad (4.26)$$

$$B = a_y/2 \quad (4.27)$$

$$x = \tau. \quad (4.28)$$

Podemos, portanto, utilizar o processo de linearização associado ao processo de regressão linear para obtermos informações a respeito de constantes físicas mesmo que o conjunto de dados experimentais obtidos não siga uma tendência linear.

4.4 Linearização e teste de hipóteses

Nos casos em que um fenômeno não segue uma tendência linear, se tivermos um modelo do fenômeno físico considerado, podemos empregar o processo da linearização com o intuito de transformar o conjunto de dados de forma que ele passe a representar uma reta. O sucesso desse procedimento, no entanto, depende de a teoria usada como referência estar correta. Muitas vezes ocorre que não temos conhecimento acerca da teoria que descreve um fenômeno ou temos mais de uma teoria, sem ter certeza de qual é a mais adequada.

⁴ Veja que aqui estamos usando y para duas coisas distintas: um eixo vertical através do qual calculamos o deslocamento Δy de um corpo sujeito à gravidade, e o eixo da variável dependente de um gráfico (que é representado no sentido "da parte inferior da página, para a parte superior").

Podemos então utilizar uma regressão linear como um método de teste, validando uma ou outra teoria com base nos valores obtidos para o coeficiente de dispersão linear r^2 .

Digamos que ao fazer uma série de medidas de uma grandeza ξ em função de outra grandeza ρ (Tabela 4.4), tenhamos um conjunto que segue uma forma que não é uma reta (Figura 4.7). Além disso, temos duas teorias, cada uma com as seguintes previsões:

$$\xi = \begin{cases} \alpha e^{\beta\rho}, & \text{Teoria 1} \\ \alpha\rho^2 + \beta, & \text{Teoria 2.} \end{cases} \quad (4.29)$$

Podemos realizar a regressão linear em ambos os casos e comparar os coeficientes r para verificar qual das duas teorias descreve melhor os dados obtidos. Tomando o logaritmo no primeiro caso, temos

$$\ln(\xi) = \ln(\alpha e^{\beta\rho}) \quad (4.30)$$

$$\ln(\xi) = \ln(\alpha) + \beta\rho \quad (4.31)$$

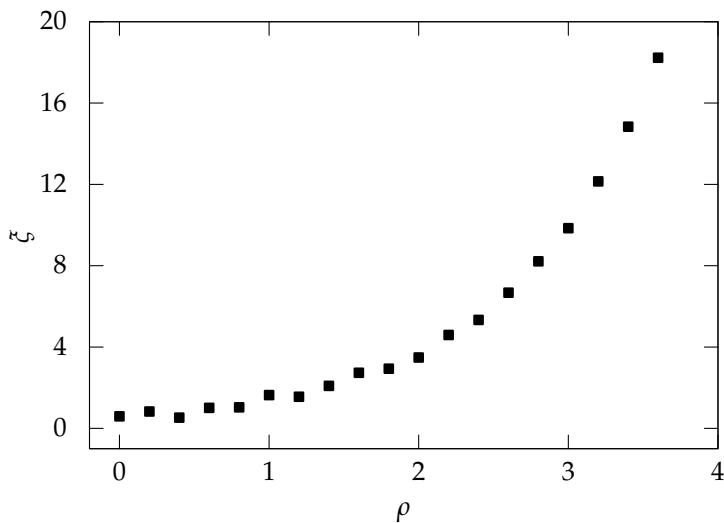


Tabela 4.4: Dados medidos para ξ em função de ρ .

Figura 4.7: Dados medidos de ξ em função de ρ . Visivelmente o comportamento é não linear.

Logo,

$$y = \ln(\xi) \quad (4.32)$$

$$x = \rho \quad (4.33)$$

$$A = \beta \quad (4.34)$$

$$B = \ln(\alpha) \quad (4.35)$$

No segundo caso, temos uma identificação mais simples:

$$y = \xi \quad (4.36)$$

$$x = \rho^2 \quad (4.37)$$

$$A = \alpha \quad (4.38)$$

$$B = \beta. \quad (4.39)$$

Podemos então usar os resultados dessas linearizações para transformar a tabela inicial em duas outras tabelas, cada uma considerando

as previsões de cada uma das Teorias e com a esperança de que alguma delas siga o comportamento linear, indicando que a Teoria correspondente tem fundamento.

Baseando-se nas medidas e nos valores transformados dados na Tabela 4.5, podemos realizar as regressões lineares. Os resultados podem ser vistos nas Figuras 4.8 e 4.9. Concluímos, portanto, que a Teoria 1 descreve melhor os resultados medidos.

Tabela 4.5: Dados medidos para ξ em função de ρ e os resultados das transformações baseadas nas Teorias 1 e 2.

ρ	Teoria 1		Teoria 2	
	$\ln(\xi)$	ρ^2	ξ	
0.00	-0.5260	0.00	0.5909	
0.20	-0.1850	0.04	0.8310	
0.40	-0.6346	0.16	0.5301	
0.60	0.0065783	0.36	1.0066	
0.80	0.033918	0.64	1.0345	
1.00	0.49249	1.00	1.6364	
1.20	0.44133	1.44	1.5547	
1.40	0.73770	1.96	2.0911	
1.60	1.0055	2.56	2.7331	
1.80	1.0763	3.24	2.9338	
2.00	1.2485	4.00	3.4851	
2.20	1.5249	4.84	4.5948	
2.40	1.6740	5.76	5.3332	
2.60	1.8980	6.76	6.6722	
2.80	2.1060	7.84	8.2156	
3.00	2.2870	9.00	9.8453	
3.20	2.49719	10.24	12.1483	
3.40	2.69717	11.56	14.8377	
3.60	2.90308	12.96	18.2303	

4.5 Erros nos parâmetros de uma regressão linear

Diferentemente da parte teórica, onde assumimos o conhecimento de constantes como a aceleração da gravidade g e calculamos o deslocamento de uma partícula com o passar do tempo, no laboratório podemos medir o tempo e o deslocamento facilmente. O valor da gravidade, por outro lado, é mais difícil de ser determinado. Utilizando uma regressão linear, podemos identificar a relação entre o coeficiente B da equação da reta e g . Sabemos, no entanto, que a toda medida temos um erro associado. Qual seria, nesse caso, o erro associado ao valor de g ?

Utilizando algumas considerações⁵ acerca da distribuição das medidas y_i em torno de seus valores ideais correspondentes, temos que

⁵ John R. Taylor. *An Introduction to Error Analysis*. 2nd Edition. University Science Books, 1997. ISBN: 0-935702-75-X

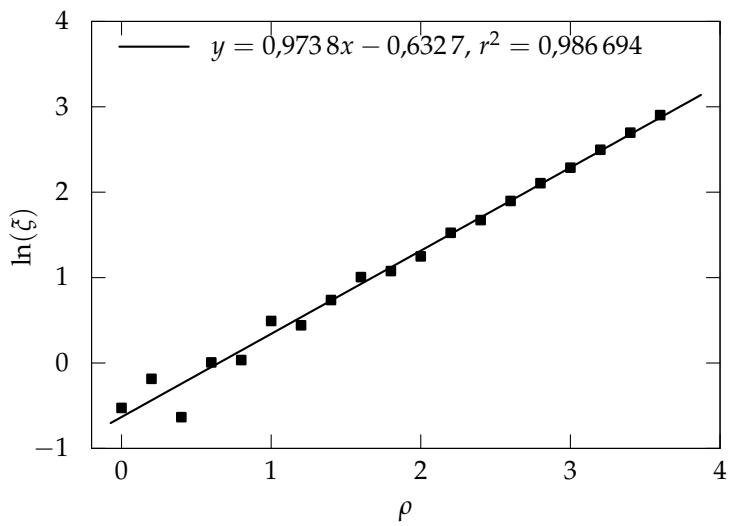


Figura 4.8: Dados ajustados segundo as previsões da Teoria 1.

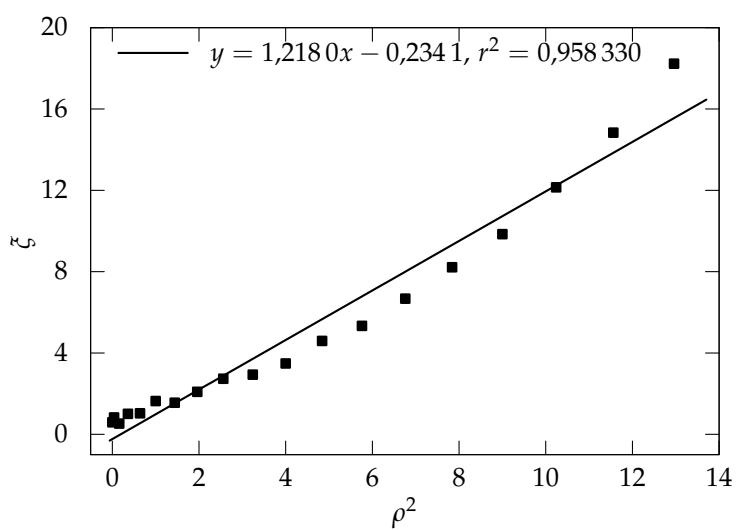


Figura 4.9: Dados ajustados segundo a Teoria 2.

o erro associado aos parâmetros A e B são dados por

$$\delta A = \xi_y \sqrt{\frac{\sum x_i^2}{\Delta}} \quad (4.40)$$

$$\delta B = \xi_y \sqrt{\frac{N}{\Delta}} \quad (4.41)$$

onde N é o número de pontos experimentais e a soma se dá sobre todos os pontos experimentais. Além disso,

$$\xi_y = \sqrt{\frac{1}{N-2} \sum (y_i - A - B x_i)^2} \quad (4.42)$$

$$\Delta = N \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2. \quad (4.43)$$

Podemos então calcular não só o melhor valor associado a uma constante física através dos coeficientes A e B da melhor reta, mas também determinar qual o erro associado a cada uma dessas constantes. Nem sempre temos uma correspondência simples entre uma constante física e um dos parâmetros da equação da reta, nesses casos, ao calcular o valor da constante física, precisamos calcular o erro propagado através da fórmula geral discutida no Capítulo 3.

Exemplo: Cálculo dos erros dos coeficientes A e B

Vamos determinar os erros associados aos coeficientes da regressão linear apresentada no exemplo da Seção 4.2. Note que os termos $\sum x_i$ e $\sum x_i^2$ que aparecem nas Equações (4.40) e (4.43) estão disponíveis na Tabela (4.2), porém na prática utilizamos uma calculadora ou um programa de computador para realizar o cálculo dos coeficientes da regressão linear, e por isso não temos de antemão tais valores⁶. Nesse caso, será necessário determinar os valores de $\sum x_i$ e de $\sum x_i^2$, além do valor de $\sum (y_{1,i} - A - B x_i)^2$ — novamente, a elaboração de uma tabela ajuda na determinação de tal valor, como mostrado na Tabela 4.6. Uma vez determinados tais valores, determinar os erros δA e δB é

i	x_i	$y_{1,i}$	$(\Xi_i)^2$
1	0,714	14,577	0,0934
2	2,693	20,696	0,2687
3	4,389	25,226	0,0002
4	4,960	27,449	0,2555
5	6,245	30,242	0,2879
6	7,277	33,378	0,2309
7	7,579	34,195	0,3190
8	7,719	35,715	0,2887
9	7,912	35,011	0,5516
10	8,280	37,529	0,4584
11	9,034	40,590	2,2134
12	9,442	39,156	1,3547
13	10,306	43,238	0,1152
14	10,572	42,406	1,6548
15	11,177	44,796	0,4928
16	15,335	57,611	0,0879
17	17,023	63,832	0,7863
18	18,926	68,063	0,3156
19	20,608	74,408	0,5827
20	20,876	75,083	0,4077
21	21,095	75,248	0,0225
22	22,225	77,243	1,5069
23	22,407	81,058	4,1791
24	22,469	78,821	0,1427
25	23,077	80,714	0,0896
26	26,421	91,433	0,1932
27	26,863	91,777	0,2868
28	27,360	93,291	0,2549
$\sum_i (y_{1,i} - A - B x_i)^2:$		17,4411	

Tabela 4.6: Tabela com os valores de $(\Xi_i)^2 = (y_{1,i} - A - B x_i)^2$ e da soma $\sum_i (y_{1,i} - A - B x_i)^2$.

⁶ Algumas calculadoras disponibilizam os valores de $\sum x_i$ e $\sum x_i^2$ juntamente com os valores de A , B , e r .

relativamente simples:

$$\xi_y = \sqrt{\frac{1}{N-2} \sum (y_i - A - B x_i)^2} \quad (4.44)$$

$$= \sqrt{\frac{17,441\,1}{28-2}} \quad (4.45)$$

$$= 0,058\,14, \quad (4.46)$$

$$\Delta = N \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2 \quad (4.47)$$

$$= 28 \cdot 7\,295,757 - (392,984)^2 \quad (4.48)$$

$$= 49\,844,766, \quad (4.49)$$

$$\delta A = \xi_y \sqrt{\frac{\sum x_i^2}{\Delta}} \quad (4.50)$$

$$= 0,058\,14 \cdot \sqrt{\frac{7\,295,757}{49\,844,766}} \quad (4.51)$$

$$= 0,022\,244, \quad (4.52)$$

$$\delta B = \xi_y \sqrt{\frac{N}{\Delta}} \quad (4.53)$$

$$= 0,058\,14 \cdot \sqrt{\frac{28}{49\,844,766}} \quad (4.54)$$

$$= 0,001\,378. \quad (4.55)$$

Assim, podemos denotar os coeficientes linear e angular com seus devidos erros:

$$A = (12,140\,462\,642 \pm 0,022\,244) \text{ Un}_y \quad (4.56)$$

$$B = (2,984\,480\,401 \pm 0,001\,378) \text{ Un}_{x/y}. \quad (4.57)$$

Note que, como discutido anteriormente, a unidade do coeficiente angular é a mesma que a da variável dependente, enquanto a unidade do coeficiente angular é dada pela razão entre as unidades da variável dependente e da variável independente. Acima denotamos conceitualmente tais unidades como Un_y e $\text{Un}_{x/y}$, respectivamente. Resta ainda notar que não devemos carregar dígitos cuja ordem de grandeza é menor que a do erro, assim obtemos finalmente

$$A = (12,14 \pm 0,02) \text{ Un}_y \quad (4.58)$$

$$B = (2,984 \pm 0,001\,4) \text{ Un}_{x/y}. \quad (4.59)$$

5 Desvio padrão

Como mencionado no Capítulo 3, podemos interpretar o desvio das medidas em relação à média como uma medida relacionada à incerteza — ou erro — das medidas. Verificaremos o por quê dessa afirmação e como chegar ao valor da incerteza — tanto para cada uma das medidas, quanto para o valor da incerteza associada ao valor médio das medidas —.

5.1 Histogramas

Um método útil para verificar a distribuição das medidas em torno de seu valor mais provável é a elaboração de um *histograma*. Imagine o seguinte experimento: Pegamos uma tábua e afixamos uma série de pregos, de forma que suas pontas fiquem presas à tábua e o resto do comprimento dos pregos fique acima dela. Prendemos a tábua de forma que ela permaneça inclinada, com a superfície com os pregos para cima. Abaixo da região de pregos, colocamos várias pequenas caixas numeradas, com a de número 25 exatamente no centro da tábua. Soltamos então uma pequena bola de gude da posição central acima dos pregos. A bola descerá colidindo com os pregos aleatoriamente e finalmente cairá em uma das caixas. Se repetirmos esse procedimento várias vezes e contarmos quantas vezes a bola cai em cada caixa, podemos fazer um gráfico (um histograma) como o da Figura 5.1.

Se utilizássemos caixas menores, numerando-as como 21,1, 21,2, etc., e aumentássemos o número de vezes que soltamos a bola de gude, chegamos — em um limite de caixas muito pequenas e um número de lançamentos muito grande — a uma curva chamada de *distribuição normal* ou *distribuição gaussiana* (veja a Figura 5.1).

5.2 Desvio padrão

No caso de realizarmos uma medida qualquer, temos valores numéricos pertencentes ao conjunto dos números Reais, não aos Inteiros como na numeração das caixas. Nesse caso, contamos o número de ocorrências entre dois valores quaisquer. Se por exemplo, as caixas que colocamos abaixo da tábua no exemplo anterior tinham 1,00 cm de largura, podemos dizer que as bolas que caem na 23^acaixa caem entre 23,0 cm e 24,0 cm à direita do início da tábua. Vemos então que para qualquer medida, mesmo que sejam números pertencentes aos Reais ao invés de Inteiros, podemos fazer um histograma.

É possível se mostrar¹ que o centro da distribuição normal é igual

¹John R. Taylor. *An Introduction to Error Analysis*. 2nd Edition. University Science Books, 1997. ISBN: 0-935702-75-X

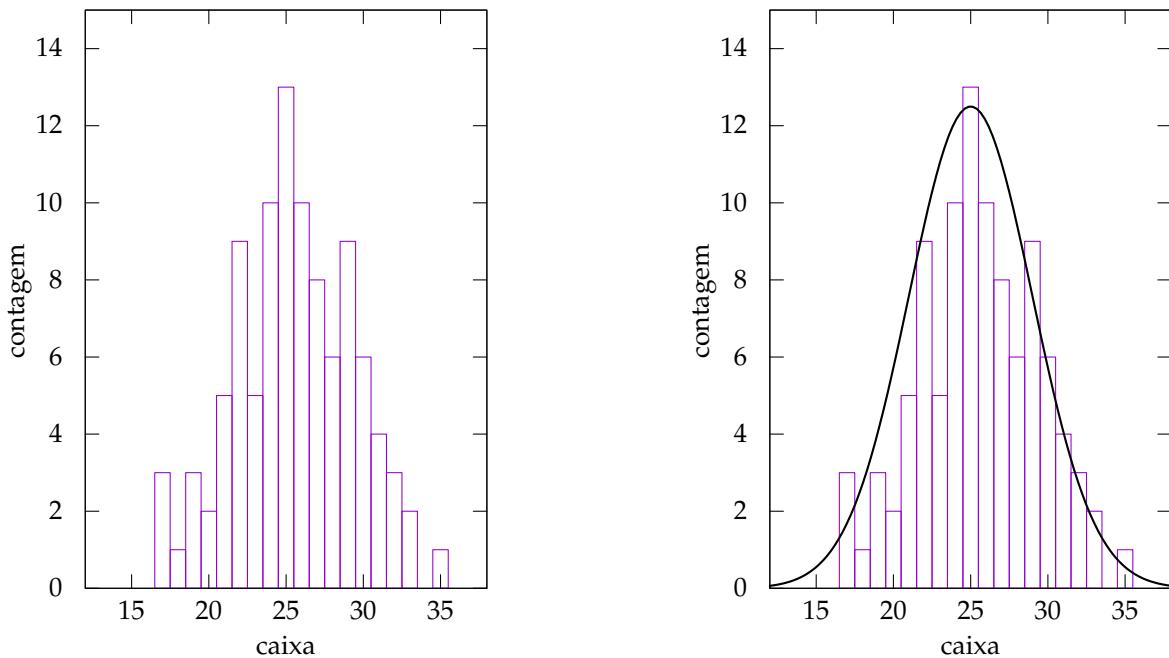


Figura 5.1: *Esquerda:* Histograma do número de vezes que a bola de gude cai em cada caixa. *Direita:* Histograma juntamente com a curva da distribuição normal.

à média dos valores obtidos para as medidas. Vemos que esse valor é o *mais provável* de obtermos. Logicamente, temos que o valor médio é então o melhor valor para uma série de medidas. Vemos também que a distribuição normal aparentemente nos dá um *limite inferior* e um *limite superior* para o valor de uma medida. O problema principal reside no fato de que a distribuição diminui, porém não chega a zero à medida que nos afastamos do pico central.

Podemos calcular, a partir das próprias medidas, um parâmetro que leva em conta as variações em torno do valor médio, denominado *variância* e definido como²

$$\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \langle x \rangle)^2}{N}. \quad (5.1)$$

Quanto mais as medidas diferem do valor médio — isto é, quanto mais elas se espalham, tornando a largura do pico maior —, maior será o valor da variância. No entanto, como esse valor não tem as mesmas unidades das medidas que estamos tratando, podemos utilizar o *desvio padrão*, definido como a raiz quadrada da variância e representado por σ :

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \langle x \rangle)^2}. \quad (5.2)$$

Essa grandeza, ao contrário da variância, possui as mesmas unidades que as medidas. Se tomarmos a faixa de valores entre o valor médio *menos* o desvio padrão e o valor médio *mais* o desvio padrão, temos aproximadamente 63% das medidas realizadas. **O valor do desvio padrão pode então ser interpretado como a incerteza de uma medida qualquer realizada**, pois podemos afirmar que “o valor real de uma medida está contido entre $x_i - \sigma$ e $x_i + \sigma$ com 63% de certeza”. Se

² Jay L. Devore, Probabilidade e estatística para engenharia e ciências.

precisamos de mais certeza de que a medida se encontra entre dois valores quaisquer, podemos utilizar como incerteza o valor de 2σ .

A definição mostrada acima para o desvio padrão não é a que usamos na prática. Tal definição é dada para uma *população*, isto é, para todos os valores possíveis de uma dada grandeza. Não podemos calcular tal valor quando tratamos de medidas, pois podemos ter um número infinito delas. Podemos, no entanto, utilizar o *desvio padrão amostral*: Como os valores das medidas x_i estão mais próximos do valor médio da amostra $\langle x \rangle$, do que do valor médio da população, o valor do somatório será menor que se utilizássemos a média da população. Tal problema pode ser contornado utilizando-se como denominador $N - 1$, obtendo

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \langle x \rangle)^2}. \quad (5.3) \quad \text{Desvio padrão amostral.}$$

Dessa forma, o desvio padrão calculado para uma amostra aproxima adequadamente o desvio padrão calculado para a população.

Uma maneira mais simplista de interpretar a questão de utilizar uma fórmula ou outra é o fato de que o desvio padrão amostral resulta em um valor um pouco maior, dando um “garantia” maior quando σ é usado como erro. Além disso, se temos somente um valor de medida, o valor de σ torna-se indefinido, o que reflete o desconhecimento acerca do valor do erro. Resta dizer ainda que o valor do desvio padrão é uma característica do equipamento e método de medida utilizado. A partir de 5 ou 10 medidas, o valor de σ varia muito pouco.

Finalmente, não parece razoável que essa incerteza seja a mesma para o valor médio $\langle x \rangle$, pois conforme o número de medidas aumenta, esperamos que o valor da incerteza diminua. De fato, podemos considerar que a incerteza no valor médio pode ser calculada através de

$$\sigma_{\langle \rangle} = \sigma / \sqrt{N}, \quad (5.4) \quad \text{Desvio padrão da média.}$$

onde $\sigma_{\langle \rangle}$ é chamado de *desvio padrão da média*. Portanto, temos que a melhor estimativa para uma medida X qualquer é

$$X = (\langle x \rangle \pm \sigma_{\langle \rangle}). \quad (5.5) \quad \text{Melhor estimativa para uma medida.}$$

PARTE II: EXPERIMENTOS

6 Medidas

Realizaremos um experimento visando determinar a densidade de alguns sólidos. Para isso, revisaremos o conceito de densidade e o cálculo do volume de sólidos geométricos. Aplicaremos os conceitos sobre medidas diretas e indiretas realizadas com equipamentos analógicos e não-analógicos (equipamentos digitais e equipamentos dotados de escala auxiliar), observando ao obter os dados o número adequado de algarismos significativos.

6.1 Unidades, notação científica e prefixos do SI

A maior parte dos parâmetros físicos que podem ser medidos têm algum tipo de unidade associada a eles. Ao determinarmos o valor numérico associado a um comprimento, por exemplo, devemos indicar qual foi a unidade utilizada para determinar tal valor. Assim, sempre devemos indicar a unidade juntamente com a medida:

$$\ell = 22,3 \text{ cm} \quad (6.1)$$

$$v = 14,82 \text{ m/s} \quad (6.2)$$

$$A = 8,0 \text{ m}^2, \quad (6.3)$$

etc.

Além disso, é comum associarmos alguns prefixos multiplicativos às unidades. No primeiro exemplo acima, cm não se refere a uma unidade, mas sim a *centésimos de metro*, onde o c indica *centésimos* da unidade m (o metro). Isso é um recurso amplamente adotado pois muitas vezes apresentar os valores usando sempre a unidade base pode ser inconveniente. Abaixo listamos os prefixos mais comuns:

$$n = 0,000\,000\,001 \quad (6.4)$$

$$\mu = 0,000\,001 \quad (6.5)$$

$$m = 0,001 \quad (6.6)$$

$$c = 0,01 \quad (6.7)$$

$$d = 0,1 \quad (6.8)$$

$$da = 10 \quad (6.9)$$

$$h = 100 \quad (6.10)$$

$$k = 1\,000 \quad (6.11)$$

$$M = 1\,000\,000 \quad (6.12)$$

$$G = 1\,000\,000\,000. \quad (6.13)$$

Muitas vezes também pode ser conveniente substituir os prefixos por potências de 10, sendo que o resultado é equivalente. Os prefixos

acima, por exemplo, correspondem às seguintes potências:

$$n = 1 \cdot 10^{-9} \quad (6.14)$$

$$\mu = 1 \cdot 10^{-6} \quad (6.15)$$

$$m = 1 \cdot 10^{-3} \quad (6.16)$$

$$c = 1 \cdot 10^{-2} \quad (6.17)$$

$$d = 1 \cdot 10^{-1} \quad (6.18)$$

$$da = 1 \cdot 10^1 \quad (6.19)$$

$$h = 1 \cdot 10^2 \quad (6.20)$$

$$k = 1 \cdot 10^3 \quad (6.21)$$

$$M = 1 \cdot 10^6 \quad (6.22)$$

$$G = 1 \cdot 10^9. \quad (6.23)$$

6.2 Tipos de Medidas: Medidas Diretas e Indiretas

¹O conteúdo descrito nas seções seguintes é um resumo do Capítulo 1.

As medidas¹ podem ser classificadas em dois tipos: diretas e indiretas. Realizar uma medida de uma grandeza, significa fazer uma *comparação direta* ou *indireta* entre o que desejamos medir e um padrão de medida. No caso de, por exemplo, estarmos interessados em verificar o tamanho de um lápis, basta alinhar sua base ao zero de uma régua e verificarmos quantas marcas estão compreendidas no comprimento de tal lápis. Temos, portanto, uma medida direta de uma grandeza.

Algumas medidas, no entanto, não podem ser feitas de maneira direta – ou podem ser determinadas de maneira mais conveniente de forma indireta. Se necessitamos saber a área de uma folha retangular, basta verificarmos as medidas laterais e então multiplicá-las. Desta forma, estamos determinando a área de uma maneira *indireta*.

O volume de um paralelepípedo pode ser determinado de maneira indireta através do produto de suas três dimensões. Para um sólido irregular, no entanto, é mais conveniente mergulhá-lo em um líquido e verificar através de uma escala graduada impressa no recipiente que comporta tal líquido qual é o volume deslocado. Portanto, uma grandeza qualquer pode ser determinada de maneira direta ou indireta, sendo que a escolha de um ou outro tipo de método é uma questão de conveniência.

6.3 Tipos de equipamentos: analógicos e não-analógicos

Os equipamentos de medida podem ser divididos em dois tipos: analógicos e não analógicos. Os equipamentos analógicos são aqueles que permitem que realizemos uma estimativa de valores entre duas marcas quaisquer de sua escala. São exemplos deste tipo de equipamento réguas, velocímetros de ponteiro, relógios de ponteiros, etc.

Outra classe de equipamento são não analógicos: nela se incluem os equipamentos digitais e aqueles dotados de escalas auxiliares. Nos equipamentos digitais, os dados da medida são mostrados através de

um visor digital que permite a leitura direta dos valores numéricos. Já os equipamentos dotados de escala auxiliar — também conhecida como nônio ou vernier — possibilitam a leitura em uma escala analógica principal, porém com a leitura da subdivisão da escala principal na escala auxiliar. Como a escala auxiliar tem divisões muito “finas”, no entanto, não é possível estimar dígitos menores do que a menor divisão da escala auxiliar.

6.4 Medidas e Algarismos Significativos

Suponhamos que precisamos usar uma trena para realizar uma medida de um muro. Tal equipamento foi elaborado de tal forma que um metro está subdividido em 10 partes. Alinhamos uma extremidade da trena — aquela que contém o zero — com uma extremidade do muro e verificamos a outra extremidade. Vemos que o muro passa da marca dos 15 metros por três subdivisões, mas não passa da quarta subdivisão. Cada uma dessas subdivisões corresponde a um décimo de um metro, o que resulta no seguinte valor para a medida:

$$\ell = 15,3 \text{ m.} \quad (6.24)$$

No entanto, sabemos que o muro termina em algum lugar entre a terceira e a quarta marca, sendo então maior que 15,3 m. Nesse caso, podemos estimar mais um algarismo. Se, por exemplo, a extremidade do muro está próxima da metade da distância entre as duas marcas da trena, porém antes dela, poderíamos estimar um valor 4 (isto é, quatro décimos da distância entre as duas subdivisões). Finalmente,

$$\ell = 15,34 \text{ m.} \quad (6.25)$$

Poderíamos realizar uma estimativa com mais casas após o 4, mas a validade dela seria duvidosa: se já não temos certeza sobre a medida ser 4 (poderia ser 3 ou 5, em escalas menores é muito difícil efetuar uma estimativa razoável), não temos ganho algum em denotar mais algarismos após o 4. Ao conjunto de algarismos que temos certeza (pois foram verificados no instrumento) e ao algarismo estimado, damos o nome de *algarismos significativos*. O último algarismo também é conhecido como *algarismo duvidoso*.

Em casos onde realizamos uma medida que coincide exatamente com uma marca, devemos considerar que o equipamento permitiria expressar divisões menores, quando for o caso. Se, por exemplo, ao medirmos o muro com a trena mencionada a extremidade coincidir com a marca de 15 m, devemos expressar a medida como

$$\ell = 15,00 \text{ m,} \quad (6.26)$$

pois sabemos que não foi ultrapassada nenhuma submarca de décimos de metro, e determinamos que o algarismo estimado também é zero (pois se aparentemente coincide com a marca, não a ultrapassa em quantidade apreciável).

Em equipamentos não-analógicos, como um equipamento com um mostrador digital ou um equipamento dotado de nônio, não

podemos efetuar a leitura de um algarismo estimado. Nesse caso, temos somente os algarismos dados pela leitura. Finalmente, temos que os zeros à esquerda têm a função de posicionar a vírgula e, portanto, não são algarismos significativos. Por exemplo, a medida 0,00567 s só tem três algarismos significativos.

6.4.1 Operações envolvendo medidas

Quando efetuamos contas utilizando duas medidas, é comum obtermos resultados com várias casas após a vírgula. No caso da multiplicação, devemos limitar o número de algarismos significativos àquele da medida que tiver o menor número. Por exemplo

$$12,03 \div 3,6 = 3,\bar{3}4 = 3,3 \quad (6.27a)$$

$$198,633 \times 3,211 = 637,\bar{8}1056 = 637,8, \quad (6.27b)$$

onde a barra representa o último algarismo significativo.

Para o caso da soma ou subtração, mantemos o número de casas decimais da medida que tem o menor número de casas após a vírgula:

$$12,03 + 3,6 = 15,\bar{6}3 \quad (6.28)$$

$$= 15,6. \quad (6.29)$$

Quando efetuamos uma operação envolvendo uma constante matemática e uma medida, conservamos no resultado o mesmo número de algarismos significativos da medida. Isso também ocorre quando uma medida é o argumento de uma função. Por exemplo,

$$A = \pi \times (3,66 \text{ m})^2 \quad (6.30)$$

$$= \pi \times (13,\bar{3}956 \text{ m}^2) \quad (6.31)$$

$$= 42,\bar{0}8351855 \text{ m}^2 \quad (6.32)$$

$$= 42,1 \text{ m}^2 \quad (6.33)$$

$$x = \ln 3,555 \quad (6.34)$$

$$= 1,26\bar{8}355063 \quad (6.35)$$

$$= 1,268 \quad (6.36)$$

6.4.2 Arredondamento

Nos exemplos acima, usamos uma barra para denotar o último algarismo significativo. Fazemos isso pois o procedimento de descarte dos algarismos excedentes deve ser realizado somente no final da conta, sempre observando os critérios de *arredondamento*.

Quando em situações como as das Equações (6.27) obtemos resultados do tipo

$$\ell = 134,\bar{3}9487, \quad (6.37)$$

precisamos fazer um arredondamento. No exemplo acima, vemos que 134,4 é um número mais próximo do resultado do que 134,3. Portanto, adotamos as seguintes regras ao realizarmos o arredondamento:

1. Se o algarismo seguinte ao duvidoso for menor que 5, simplesmente descartamos os algarismos excedentes.
2. Se o algarismo seguinte ao duvidoso for maior ou igual a 5, aumentamos o duvidoso de uma unidade e descartamos os demais.

Consideremos ainda o seguinte caso

$$m = 956 \times 102,25 = 97751. \quad (6.38)$$

Se adotarmos o procedimento acima, teremos o número 978 e teremos um número aproximadamente 100 vezes menor que o resultado. Nesse caso, utilizamos a notação científica:

$$m = 9,78 \times 10^4. \quad (6.39)$$

6.5 Experimento: Determinação da densidade volumétrica de massa de sólidos

Para explorar os conceitos mencionados acima, vamos calcular a densidade de alguns sólidos. Verificaremos as dimensões dos corpos utilizando régua e paquímetro e utilizaremos esses resultados para calcular o volume, nos preocupando com o número de algarismos significativos adequado. Após isso, vamos calcular a densidade dos corpos utilizando o valor obtido para a massa com o auxílio de uma balança.

6.5.1 Volume de sólidos geométricos

Para que possamos determinar a densidade de um corpo qualquer, é importante que saibamos determinar seu volume. Se seu formato é o de um sólido geométrico, o volume pode ser determinado através de suas medidas. Abaixo listamos algumas formas comuns, juntamente com as expressões utilizadas para determinar seus volumes.

$$V_{\text{paralelepípedo}} = a \cdot b \cdot c \quad (6.40)$$

$$V_{\text{cilindro}} = \pi \cdot r^2 \cdot h \quad (6.41)$$

$$V_{\text{esfera}} = \frac{4}{3} \cdot \pi r^3. \quad (6.42)$$

6.5.2 Volume de sólidos irregulares

No caso de termos um sólido com forma irregular, uma maneira simples de determinar seu volume é o submergindo em um fluido e verificando a alteração do volume ocupado por ele. Para isso podemos utilizar uma *proveta*. A proveta é um cilindro com diâmetro uniforme com uma escala volumétrica graduada impressa em sua lateral. Tal volume corresponde ao produto da área da seção circular da proveta pela altura em relação ao fundo dela. Assim, se temos um certo volume de fluido, ao submergirmos um corpo notaremos um aumento do volume lido na proveta. Esse aumento corresponde ao volume do corpo submerso.

É claro que a utilização desse método está sujeita a algumas restrições. Primeiramente, o corpo não pode absorver o fluido. Além disso, a *densidade volumétrica de massa* do corpo precisa ser maior que a do fluido.

6.5.3 Densidade

² Existem outros tipo de densidade como por exemplo as densidades linear e superficial de massa, densidades de carga elétrica, etc.

A *densidade²* volumétrica de massa de um corpo é uma medida da razão entre sua massa e seu volume:

$$\rho \equiv \frac{M}{V}. \quad (6.43)$$

Essa razão é útil para corpos em geral: sabemos que se um corpo é capaz de boiar na água, sua densidade é necessariamente menor que a densidade da água. Um navio, por exemplo, tem uma densidade menor que a da água em virtude dos espaços vazios em seu casco, que são ocupados por ar. Além disso, a densidade também é uma informação útil ao tratarmos de materiais homogêneos, como uma barra metálica, pois é um valor característico de cada substância. Se precisamos determinar o tipo de metal de uma barra, por exemplo, basta determinarmos sua densidade e compararmos com uma tabela de referência.

6.5.4 Objetivos

1. Determinar propriedades de alguns corpos sólidos utilizando medidas diretas e indiretas;
2. Determinar o número de algarismos significativos adequados às medidas;
3. Calcular o volume dos corpos sólidos;
4. Determinar o volume de um corpo irregular usando uma proveta;
5. Verificar com auxílio de uma balança a massa dos corpos;
6. Utilizar os dados obtidos para calcular as densidades dos sólidos.

6.6 Material Necessário

- Paralelepípedos de tamanhos diferentes;
- Cilindros de tamanhos diferentes;
- Corpos irregulares de tamanhos diferentes;
- Réguas;
- Paquímetro;
- Micrômetro;
- Proveta com água;
- Balança.

6.7 Procedimento Experimental

Tome um paralelepípedo, um cilindro, e um corpo irregular e os utilize no decorrer do experimento. Anote os resultados obtidos nas próximas seções na Tabela 6.1, sempre observando o número de algarismos significativos adequados.

6.7.1 Determinação das medidas utilizando uma régua

Atenção: as medidas realizadas com a régua permitem a estimativa de um algarismo significativo após a casa dos milímetros. Efetue esta estimativa.

1. Utilizando uma régua, determine as medidas ℓ_1 , ℓ_2 e ℓ_3 das laterais do paralelepípedo, e o diâmetro \varnothing e o comprimento ℓ do cilindro.
2. Determine o volume V de cada sólido observando o número de algarismos significativos.

6.7.2 Determinação das medidas utilizando um paquímetro

Atenção: as medidas realizadas com o paquímetro consistem de duas partes: a verificação do valor na escala principal e a leitura do valor excedente em relação ao valor principal na escala auxiliar (ônio).

1. Utilizando o paquímetro, determine as medidas ℓ_1 , ℓ_2 e ℓ_3 das laterais do paralelepípedo, e o diâmetro \varnothing e o comprimento ℓ do cilindro.
2. Determine o volume V de cada sólido observando o número de algarismos significativos.

6.7.3 Determinação das medidas utilizando um micrômetro

Atenção: as medidas realizadas com o micrômetro consistem de duas partes: a verificação do valor na escala principal e a leitura do valor excedente em relação ao valor principal no tambor. Essa segunda parte pode ser estimada ou através de escala auxiliar, dependendo do equipamento disponível.

1. Utilizando o micrômetro, determine as medidas ℓ_1 , ℓ_2 e ℓ_3 das laterais do paralelepípedo, e o diâmetro \varnothing e o comprimento ℓ do cilindro. Note O micrômetro pode não ser capaz de realizar algumas medidas pois elas excedem a abertura máxima do equipamento. Nesses casos, utilize o paquímetro.
2. Determine o volume V de cada sólido observando o número de algarismos significativos.

6.7.4 Determinação do volume de um corpo irregular usando uma proveta

Atenção: a proveta permite que façamos estimativas entre duas marcações quaisquer por se tratar de um instrumento de medida analógico.

1. Preencha a proveta com um volume V_i de água suficiente para cobrir o corpo.
2. Anote o valor inicial de volume na tabela correspondente.
3. Submerja o corpos irregular e anote a nova leitura V_f de volume na tabela correspondente.
4. Determine o volume V do corpo através da diferença entre os volumes final V_f e inicial V_i .

6.7.5 Determinação das massas e densidades dos sólidos

1. Utilize a balança para determinar a massa m de cada sólido com o número de algarismos significativos adequado;
2. Determine a densidade ρ de cada sólido observando o número de algarismos significativos. Para os sólidos regulares, utilize as medidas de volume obtidas através das medidas realizadas com o paquímetro.

Medidas

Turma: _____ Data: _____

Aluno(a): _____ Matrícula: _____

6.8 Questionário

Questão 1. (2 pontos) Calcule os volumes e densidades considerando o número adequado de algarismos significativos. Apresente seus cálculos.

Questão 2. (8 pontos) Preencha as tabelas com as medidas e os cálculos de volume e densidade, sempre observando o número adequado de algarismos significativos e unidades adequados. (A pontuação será dividida igualmente entre as células a serem preenchidas com valores de medidas diretas ou indiretas.)

6.9 *Tabelas***Paralelepípedo**

	ℓ_1	ℓ_2	ℓ_3	V
Régua				
Paquímetro				
Micrômetro				

Cilindro

	\varnothing	ℓ	V
Régua			
Paquímetro			
Micrômetro			

Corpo irregular

	V_i	V_f	V
Proveta			

Densidades

	m	V	ρ
Paralelepípedo			
Cilindro			
Corpo irregular			

Tabela 6.1: Medidas diretas e indiretas obtidas para os corpos de prova.

7 Movimento retilíneo uniforme (MRU) e uniformemente variado (MRUV)

Realizaremos dois experimentos distintos de forma a verificar as características do Movimento Retilíneo Uniforme – MRU e do Movimento Retilíneo Uniformemente Variado – MRUV. No primeiro caso, verificaremos a velocidade de uma esfera que se move em um fluido, sendo que ela atingirá uma velocidade terminal constante¹. No segundo realizaremos um experimento de queda livre. Utilizaremos os conceitos de medidas, algarismos significativos, e gráficos.

7.1 Gráficos²

Gráficos são ferramentas muito usadas para visualizar relações matemáticas entre uma função e seu argumento. Por exemplo, denominamos a função $f(x) = A + Bx$ como *equação da reta*, pois seu gráfico é uma reta. Cada função tem um gráfico característico.

Em experimentos de laboratório é comum procurarmos estabelecer a relação entre duas grandezas. Para uma dessas variáveis escolhemos valores de acordo com nossa conveniência e a denominamos como *variável independente*. Já a outra variável é mensurada e a denominamos como *variável dependente*, pois seus valores dependem dos valores escolhidos para a variável independente. Denotamos a variáveis independente e dependente por x e y , respectivamente. Nossa maior interesse, nesses casos, é justamente encontrar a função matemática f que relaciona x e y , ou seja, que nos dá y em função de x : $y = f(x)$.

Nos preocuparemos em estabelecer essa relação nos próximos experimentos. Hoje vamos discutir como elaborar um gráfico e o apresentar de forma clara.

7.1.1 Elaborando um gráfico

Hoje podemos fazer um gráfico rapidamente usando um programa de computador. No entanto, é interessante fazer alguns gráficos com papel milimetrado e lápis/caneta para sabermos o que tais programas estão fazendo. Além disso, existem vários tipos de gráficos, mas estamos interessados em um tipo específico, denominado em alguns programas como *gráficos de dispersão*.

Um gráfico de dispersão consiste em dois eixos — um horizontal e outro vertical — em relação aos quais denotamos os valores de nossas medidas em pares ordenados. Se tomarmos as medidas da Tabela 7.1, podemos fazer um gráfico como o da Figura 7.1.

¹ Veremos o conceito de *velocidade terminal* em detalhes na Experiência 10.

² O conteúdo dessa seção é um resumo do Capítulo 2.

Tubo 1		Tubo 2	
t (s)	T °C	t (s)	T °C
0	98	0	92
5,71	93	8,27	87
17,79	88	17,43	82
34,50	83	31,07	77
61,63	78	44,98	72
83,96	73	67,78	67
109,09	68	96,57	62
130,78	63	115,26	57
149,09	58	135,78	52
184,21	53	170,32	47
217,09	48	213,28	42
261,28	43	268,04	37
315,90	38	349,44	32
373,35	33	465,71	27
470,55	28	575,21	24
504,21	25		

Tabela 7.1: Dados para a temperatura de tubos metálicos em função do tempo para o processo de resfriamento convectivo.

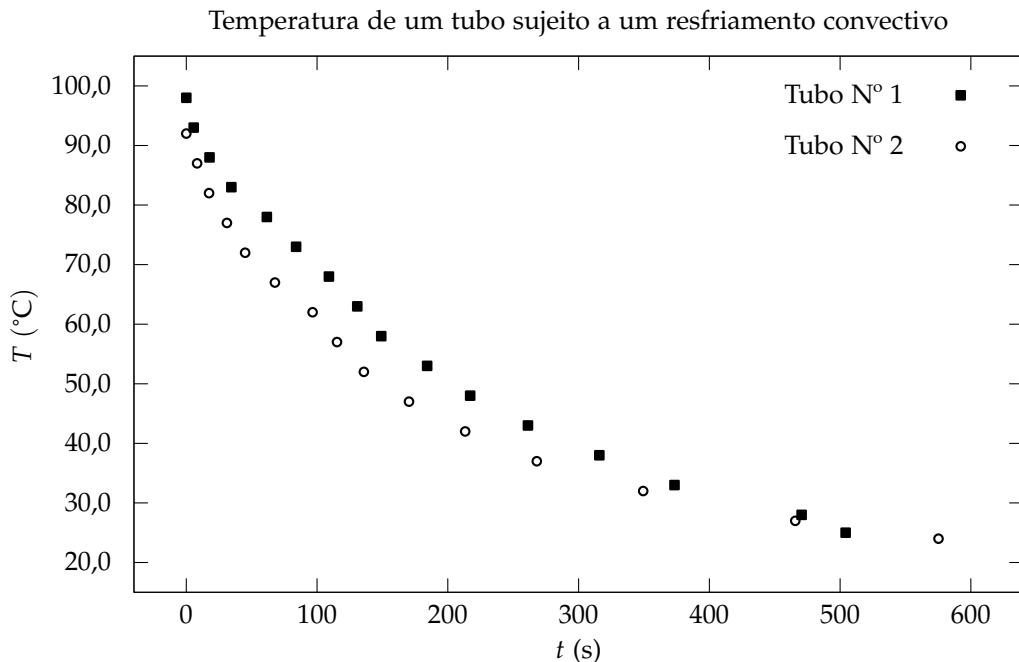


Figura 7.1: Gráfico dos dados da Tabela 7.1.

Neste gráfico podemos perceber que foram aplicados alguns princípios básicos para a elaboração de um gráfico adequado:

1. O gráfico tem dois eixos devidamente nomeados com as variáveis que representam e com as unidades das medidas representadas.
2. Ambos os eixos apresentam marcações com numerações que aparecem em *intervalos regulares* — 100 em 100 no eixo x e a cada 10 no eixo y —.
3. O eixo y foi “cortado”, iniciando em um valor um pouco menor que 20,0. Isto é adequado pois não existem dados cujos valores da variável dependente sejam menores que 20,0 °C.
4. Os eixos começam e terminam de forma que toda a área disponível do gráfico é bem utilizada.
5. O gráfico possui uma legenda indicando o que os pontos representam.
6. Nenhum ponto fica excessivamente próximo dos eixos.
7. Como há dois conjuntos de dados, temos uma diferenciação clara entre os pontos de cada conjunto.

7.1.2 Erros mais comuns ao elaborar um gráfico

É difícil estabelecer um roteiro para elaborar um gráfico adequado, pois isso depende muito do que pretendemos mostar com ele. No entanto, existe uma série de *erros comuns* ao elaborar um gráfico e que devem ser evitados:

Não utilizar adequadamente a área do gráfico: Muitas vezes nossos dados não iniciam em zero. Nesse caso devemos escolher um número próximo, porém inferior, ao primeiro valor que ocorre naquele eixo e iniciá-lo em tal número. Se, por exemplo, devemos marcar em um eixo os valores 107,25, 115,12, 129,90, 138,22, etc., uma boa escolha é iniciar o eixo em 100 e realizarmos as marcações no eixo a cada 10. Outra escolha adequada seria iniciar o eixo em 105 — porém, nesse caso, não marcamos o “canto” do gráfico³ como 105 —. Realizamos a marcação em 110 e daí em diante a cada 10.

³ Foi o que escolhemos fazer no gráfico da Figura 7.1, cujo eixo y começa em 15.

Não realizar marcações regulares nos eixos: Marcações com “espaçamento variável” não devem ser realizadas. Utilizando os dados do item acima, poderíamos realizar marcações no eixo em 105, 115, 130 e 140. Porém a distância entre essas marcações não é regular, o que dificulta a leitura do gráfico. Note que em um gráfico estamos interessados no comportamento qualitativo geral dos pontos, não nos valores específicos das variáveis que eles representam. Se desejarmos os valores, devemos buscá-los na tabela de dados.

Marcar os valores de x e y dos pontos experimentais: Os valores de abscessas (valor no eixo x) e de ordenadas (valor no eixo y) dos pontos não devem aparecer nos eixos ordenados. Novamente, no gráfico não estamos interessados nos valores exatos das variáveis correspondentes aos pontos, mas sim no seu comportamento geral.

Linhas que ligam os pontos aos eixos: Muitos alunos ligam os pontos aos eixos x e y usando linhas tracejadas. Não façam isso, mais uma vez, caso queiramos saber exatamente os valores nos eixos x e y , podemos verificá-los na tabela de dados.

Linhas que ligam os pontos entre si: Os pontos marcados a partir de dados experimentais nunca devem ser ligados entre si. Quando marcamos curvas ou retas em um gráfico, isso significa que temos conhecimento sobre todos os pontos que compõe aquela curva. Isso só pode ser razoável para os casos onde sabemos exatamente a função matemática que relaciona as variáveis x e y , não para dados experimentais. Estes são verificados “pontualmente” e não podemos afirmar nada sobre o que obteríamos entre dois pontos quaisquer. Portanto, a reta que liga dois pontos experimentais não carrega informação alguma e não deve ser traçada.

Não diferenciar conjuntos de pontos diferentes: É comum fazermos gráficos com mais que um conjunto de dados, com o intuito de compararmos seus comportamentos. Nesse caso, os conjuntos precisam ser diferenciados entre si. Para isso, basta utilizar símbolos diferentes para marcar os pontos, como quadrados, círculos, triângulos, etc., ou mesmo cores diferentes.

7.1.3 Elaborando um gráfico com papel milimetrado

Elaborar um gráfico em papel milimetrado é uma questão de observar as regras gerais para a elaboração de gráficos e usar regras de três. O

procedimento para elaborar o gráfico consiste no seguinte:

1. Verificar quais os valores mínimo x_{\min} e máximo x_{\max} para a variável do eixo x .
2. Verificar quais os valores mínimo y_{\min} e máximo y_{\max} para a variável do eixo y .
3. Verificar o tamanho do papel e desenhar os eixos *dentro da área milimetrada* e não na borda. Em geral, deixa-se um centímetro entre a borda da área milimetrada e o eixo para que possamos fazer as escalas dos eixos.
4. Decidimos os valores x_i , x_f , y_i , e y_f em que os eixos x e y começam e terminam. Notem que devemos escolher valores tais que

$$x_i < x_{\min} \quad x_f > x_{\max} \quad (7.1)$$

$$y_i < y_{\min} \quad y_f > y_{\max} \quad (7.2)$$

5. Sabendo os valores x_i e x_f em que o eixo x começa e termina, e que o eixo tem a medida m no papel milimetrado, podemos marcar a ordenada do ponto x_p a uma distância d do início do eixo, onde d é calculada como:

$$d = \frac{m(x_p - x_i)}{x_f - x_i}. \quad (7.3)$$

Se, por exemplo, temos um conjunto de dados todo compreendido entre 30 e 110 e decidimos usar esses limites para fazer um gráfico de 25 cm, podemos encontrar a distância d a partir do início do eixo em que devemos marcar o ponto $x_p = 47,2$ através de

$$d = \frac{25 \cdot (47,2 - 30)}{110 - 30} \quad (7.4)$$

$$= 5,375 \text{ cm.} \quad (7.5)$$

6. O cálculo do item acima muitas vezes não é prático. Outra possibilidade é aproximarmos a escala: tomamos x_f , x_i e m e calculamos

$$f = \frac{x_f - x_i}{m} \quad (7.6)$$

onde f representa um “fator de escala” e após o calcularmos, o arredondamos para algum dos valores seguintes: 1, 2, 2,5, 4, 5 ou 10, ou qualquer múltiplo ou submúltiplo decimal desses valores (isto é, esses números multiplicados por 10 elevado a alguma potência inteira), sempre fazendo o arredondamento para cima. A partir desse valor arredondado f' , podemos calcular a distância d entre o início do eixo e o ponto através de

$$d = \frac{x_p - x_i}{f'}. \quad (7.7)$$

7.2 Movimento retilíneo uniforme – MRU

Para um movimento unidimensional, a definição de velocidade média é dada por

$$\langle v \rangle = \frac{\Delta x}{\Delta t}. \quad (7.8)$$

Para o caso particular em que a velocidade é constante, para qualquer intervalo de tempo tomado, a razão acima resulta no mesmo valor. Nesse caso, dizemos que a velocidade é constante, ou *uniforme*, e que a velocidade instantânea é idêntica à própria velocidade média:

$$v \equiv \langle v \rangle. \quad (7.9)$$

Explorando esse fato, podemos reescrever a Equação (7.8), obtendo

$$\langle v \rangle = \frac{\Delta x}{\Delta t} \quad (7.10)$$

$$\Delta x = \langle v \rangle \Delta t \quad (7.11)$$

$$= v \Delta t, \quad (7.12)$$

ou,

$$x_f = x_i + vt, \quad (7.13)$$

onde usamos $t_i \equiv 0$, $t_f \equiv t$. As variáveis x_i e x_f se referem aos valores de posição para os valores de t_i e t_f considerados, o que muitas vezes leva a notação

$$x = x_0 + at. \quad (7.14)$$

A expressão acima corresponde a uma função do tempo, uma vez que para cada valor dessa variável, temos um valor de posição distinto:

$$x(t) = x_0 + vt. \quad (7.15)$$

Comparando a equação acima com a equação de uma reta, verificamos que se fizermos um gráfico $x \times t$ — isto é, um gráfico de posição em função do tempo, ou seja um gráfico onde o eixo horizontal representa o tempo e o vertical a posição —, obteremos uma reta, como mostrado na Figura 7.2.

Evolução temporal da posição para movimentos com velocidade constante.

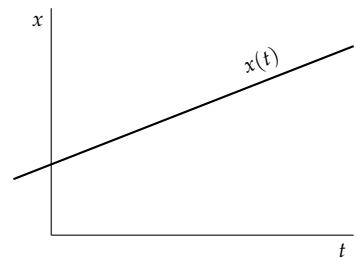


Figura 7.2: Para um movimento com velocidade constante, ao fazermos um gráfico $x \times t$ obtemos uma reta. Em particular, a figura acima representa a evolução da posição no tempo para um corpo cuja velocidade é positiva.

7.3 Movimento retilíneo uniformemente variado – MUV

Para o movimento retilíneo com aceleração constante, podemos verificar de uma maneira análoga a descrita na seção anterior que a razão

$$\langle a \rangle = \frac{\Delta v}{\Delta t} \quad (7.16)$$

resulta sempre no mesmo valor, e a aceleração instantânea é igual ao próprio valor da aceleração média. Isso nos permite escrever

$$\langle a \rangle = \frac{\Delta v}{\Delta t} \quad (7.17)$$

$$\Delta v = \langle a \rangle \Delta t \quad (7.18)$$

$$v_f = v_i + a \Delta t. \quad (7.19)$$

Note que a expressão acima indica uma variação uniforme na velocidade — isto é, uma variação linear/proportional ao tempo transcorrido —, por isso o movimento sujeito a uma aceleração constante é conhecido como *uniformemente variado*. Em particular, se escolhermos $t_i = 0$, $t_f = t$, podemos escrever

Evolução temporal da velocidade para movimentos com aceleração constante.

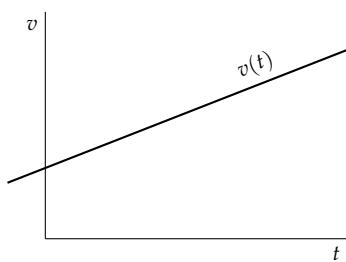


Figura 7.3: Para um movimento com aceleração constante, ao fazermos um gráfico $v \times t$ obtemos uma reta. Em particular, a figura acima representa a evolução da posição no tempo para um corpo cuja aceleração é positiva.

onde v_0 representa a velocidade quando $t = 0$. De maneira análoga ao caso anterior, comparando a equação acima com a equação da reta, verificamos que ao fazer um gráfico $v \times t$ é dado por uma reta (Figura 7.3).

Em um gráfico da velocidade em função do tempo para uma função $v(t)$ qualquer, podemos determinar o deslocamento sofrido pelo corpo cuja velocidade é descrita por tal função, em um dado intervalo de tempo, através da área delimitada pela curva $v(t)$, pelo eixo horizontal t , e pelas retas verticais que passam pelos valores t_i e t_f que delimitam o intervalo de tempo. Para o caso de um movimento que ocorre com velocidade constante, temos a área destacada na Figura 7.4. Podemos determinar uma expressão para o deslocamento ao dividir tal área em um retângulo e um triângulo, de onde obtemos A área A_1 é dada por

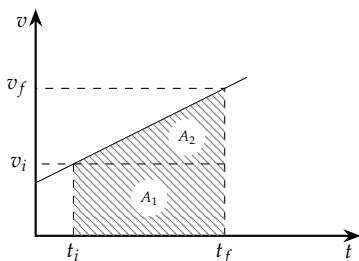


Figura 7.4: Para o caso de aceleração constante, podemos calcular a área a dividindo em um retângulo e um triângulo.

Evolução temporal da posição para aceleração constante.

$$A_1 = v_i \Delta t \quad (7.21)$$

$$A_2 = \frac{(v_f - v_i) \Delta t}{2}. \quad (7.22)$$

Logo,

$$\Delta x = v_i \Delta t + \frac{(v_f - v_i) \Delta t}{2}. \quad (7.23)$$

Utilizando a equação $v_f = v_i + at$, e fazendo ainda $t_i = 0$ e $t_f = t$, temos

$$\Delta x = v_i t + \frac{(v_i + at - v_i)t}{2} \quad (7.24)$$

e, finalmente,

$$x_f = x_i + v_i t + \frac{at^2}{2}. \quad (7.25)$$

Se escrevermos a expressão acima como uma função, temos

$$x(t) = x_0 + v_0 t + \frac{at^2}{2}, \quad (7.26)$$

onde x_0 e v_0 representam a posição e a velocidade, respectivamente, para $t = 0$. Ao fazermos um gráfico $x \times t$ da posição em função do tempo, obtemos uma *parábola* (Figura 7.5). Isso se deve ao fato de que a expressão acima segue a forma

$$y = Ax^2 + Bx + C, \quad (7.27)$$

que define a parábola.

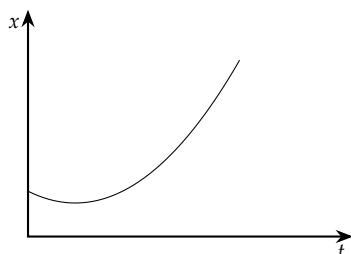


Figura 7.5: Gráfico da função $x(t)$ para o caso $a > 0$. Note que a velocidade em $t = 0$ é negativa, por isso x diminui com o passar do tempo até chegar a um valor mínimo para só então passar a aumentar.

7.4 Experimento: Determinação da evolução temporal da posição no MRU e no MRUV

Como exemplos de movimento retilíneo uniforme e de movimento retilíneo uniformemente variado, vamos realizar dois experimentos simples:

MRU

O primeiro consistirá em verificar o movimento de uma esfera metálica dentro de um tubo cilíndrico transparente, sendo que o volume interno do tubo está preenchido por um fluido viscoso e transparente. O tubo está afixado a um plano inclinado articulado, de forma que podemos variar o ângulo de inclinação. Devido à força de arrasto oferecida pelo fluido, a esfera se move a uma velocidade constante. Vamos coletar dados experimentais para duas posições de referência, bem como para o tempo necessário para que a distância entre tais posições seja transcorrida pela esfera metálica. Tais dados serão utilizados para a elaboração de um gráfico, além de determinarmos a velocidade da esfera.

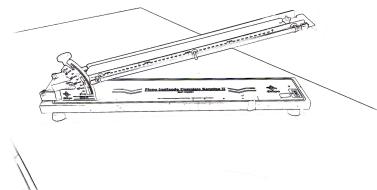


Figura 7.6: Plano inclinado com tubo preenchido com um fluido viscoso.

MRUV

No segundo caso, vamos verificar o movimento de uma esfera metálica ferromagnética em queda livre, sujeita à aceleração da gravidade. Vamos coletar dados para a posição inicial e final de dois sensores óticos, além do tempo necessário para que uma esfera em queda livre transcorra a distância entre eles. A esfera é inicialmente suspensa devido a ação de um eletroímã e, após ser solta, atravessa os dois sensores óticos, sendo que o primeiro dispara um cronômetro e o segundo o para. Através dos dados, vamos elaborar um gráfico e também determinaremos a aceleração da gravidade.

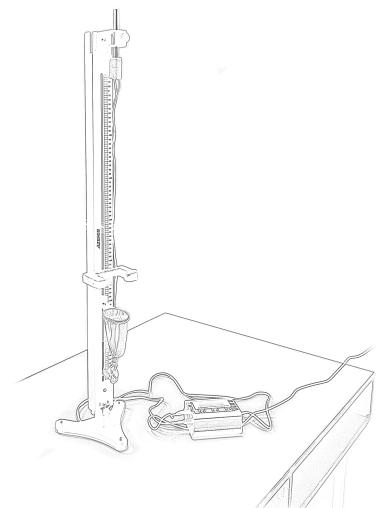


Figura 7.7: Aparato para análise de queda livre.

7.4.1 Objetivos

1. Verificar as características do Movimento Retilíneo Uniforme – MRU através do gráfico do tempo em função do deslocamento.
2. Verificar as características do Movimento Retilíneo Uniformemente Variado – MRUV através do gráfico do tempo em função do deslocamento.
3. Calcular a velocidade do MRU;
4. Determinar a aceleração da gravidade no MRUV;

7.5 Material Necessário

- Plano inclinado articulado com tubo lateral preenchido com fluido e dotado de esfera metálica ferromagnética livre para se mover dentro do tubo;

- Aparato de queda livre dotado de sensores óticos de movimento e de cronômetro eletrônico;
- Cronômetro manual;
- Régua (1,00 m);
- Ímã permanente.

7.5.1 Procedimento Experimental

MRU – Deslocamento da esfera no tubo com fluido viscoso:

1. Ajuste o plano inclinado para um ângulo de 20,0°;
2. Com um imã, atraia a esfera para a parte superior antes da posição 0,0 cm;
3. Zere o cronômetro;
4. Solte a esfera e inicie o cronômetro quando a ela passar pela posição 0,0 cm. Pare o cronômetro quando a ela passar pela posição final 10,0 cm. Anote os valores da posição inicial, final, e o tempo registrado pelo cronômetro na Tabela 7.2;
5. Repita este procedimento para os seguintes valores de posição final: 15 cm, 20 cm, 25 cm, 30 cm, 35 cm, 40 cm. A cada medida, anote os valores da posição inicial, final, e o tempo registrado pelo cronômetro na Tabela 7.2;
6. Ajuste o plano inclinado para um ângulo de 40°;
7. Repita os procedimentos do itens 2 a 5 e anote os dados obtidos na Tabela 7.3.

MRUV – Queda livre:

1. Ligue o cronômetro através do botão na parte de trás do aparelho;
2. Certifique-se de que o cronômetro esteja operando na função F1 e que o potenciômetro na parte de trás esteja no menor valor de potência que é capaz de prender a esfera;
3. Ligue o eletroímã através do disjuntor;
4. Prenda a esfera no eletroímã;
5. Posicione o sensor superior de forma que ele fique muito próximo de ativar o cronômetro (erga o sensor com o cronômetro ligado e, quando o sensor ativar, desça um pouco, afixando sua posição). Verifique a posição⁴ inicial do sensor e a anote na Tabela 7.4;
6. Posicione o sensor inferior 5,00 cm abaixo do primeiro e anote o valor de sua posição⁵ na Tabela 7.4;
7. Certifique-se de que o cronômetro esteja zerado;

⁴ Use a escala do próprio suporte vertical do aparato.

⁵ Novamente, use a escala do próprio suporte vertical do aparato.

8. Desligue o eletroímã e anote o valor do tempo registrado pelo cronômetro para a passagem da esfera na Tabela 7.4;
9. Repita a medida de tempo mais duas vezes, anotando os resultados;
10. Desloque o sensor inferior mais 5,0 cm anotando o valor de sua nova posição na Tabela 7.4;
11. Ligue o eletroímã através do disjuntor e prenda nele a esfera;
12. Zere o cronômetro;
13. Desligue o eletroímã e anote o valor do tempo registrado pelo cronômetro para a passagem da esfera na Tabela 7.4, repetindo a medida mais duas vezes e anotando os resultados;
14. Repita os itens a partir do item 10 até completar a Tabela 7.4 ou não ser mais possível deslocar o sensor inferior.

Movimento retilíneo uniforme (MRU) e uniformemente variado (MRUV)

Turma: _____ Data: _____

Aluno(a): _____ Matrícula: _____

7.6 Questionário

Questão 1. (2 pontos) Preencha as colunas de dados experimentais das tabelas com o número adequado de algarismos significativos e unidades.

Questão 2. (2 pontos) Calcule o deslocamento Δx e o tempo médio $\langle t \rangle$ para dos dados das Tabelas 7.2 e 7.3. Observe o número adequado de algarismos significativos e unidades.

Questão 3. (3 pontos) Para os dados das Tabelas 7.2 e 7.3, elabore em papel milimetrado um gráfico $x \times \langle t \rangle$, ou seja, da *distância* percorrida pela esfera contida no tubo do plano inclinado em função do valor médio de *tempo* (isto é, com a distância no eixo y e o tempo no eixo x).⁶ Note que os dois conjuntos de dados devem ser representados no mesmo gráfico.

Questão 4. (1 ponto) Calcule o o deslocamento Δx e o tempo médio $\langle t \rangle$ para os dados da Tabela 7.4. Observe o número adequado de algarismos significativos e unidades.

Questão 5. (2 pontos) Para os dados da Tabela 7.4, elabore em papel milimetrado um gráfico $x \times \langle t \rangle$, ou seja, um gráfico da *distância* percorrida pela esfera em queda livre em função dos valores médios de *tempo*.⁷

⁶ Note que a variável independente em nosso experimento é o deslocamento, sendo que deveríamos colocá-la no eixo horizontal, enquanto o tempo é nossa variável dependente e deveria estar no eixo vertical. Para fins didáticos, no entanto, vamos inverter essa relação para obter um gráfico mais usual.

⁷ Novamente, a variável independente é o deslocamento e deveria estar no eixo horizontal, enquanto o tempo é a variável dependente e deveria estar no eixo vertical. Para fins didáticos, vamos inverter essa relação para obter um gráfico mais usual.

7.7 Tabelas

Dados Experimentais

x_0	x_f	t_1	t_2	t_3

Dados calculados

Δx	$\langle t \rangle$

Tabela 7.2: Valores de tempo e deslocamento para o MRU para o ângulo de 20° .

Dados Experimentais

x_0	x_f	t_1	t_2	t_3

Dados calculados

Δx	$\langle t \rangle$

Tabela 7.3: Valores de tempo e deslocamento para o MRU para o ângulo de 40° .

Dados Experimentais

x_0	x_f	t_1	t_2	t_3

Dados calculados

Δx	$\langle t \rangle$

Tabela 7.4: Dados do MRUV

8 Lei de Hooke

Realizaremos um experimento em que submeteremos uma mola a forças com intensidades diferentes, observando as distensões correspondentes. Procuramos assim observar experimentalmente a Lei de Hooke — que afirma que as distensões são diretamente proporcionais à intensidade da força aplicada —. Utilizaremos os seguintes conceitos: medidas, algarismos significativos, gráficos, e regressão linear.

8.1 Linhas de tendência e regressão linear¹

¹ Esta seção é um resumo do Capítulo 4.

Quando realizamos um experimento, procuramos relacionar uma variável dependente a uma variável independente. Para visualizarmos a relação entre as duas, é interessante fazer uma representação gráfica da variável dependente em função dos valores da variável independente. Podemos assim verificar uma tendência geral dos pontos, que pode seguir padrões retilíneos, parabólicos, etc. Muitas vezes tal padrão é muito claro, pois os pontos tem uma dispersão baixa. Outras vezes a dispersão é razoavelmente alta e fica difícil verificar o padrão seguido pelos pontos.

Mesmo em casos em que podemos verificar um padrão aparente ao fazer um gráfico, determinar a forma mais adequada para a *linha de tendência* que melhor descreve os pontos experimentais — ou mesmo afirmar que tais pontos seguem este padrão — pode ser complicado. Se, por exemplo, fizermos uma série de medidas que seguem um padrão parabólico, mas com medidas que se restringem a um intervalo pequeno da variável independente, o gráfico terá a aparência de uma reta.

Determinar o padrão seguido pelos pontos, é, portanto, uma tarefa que não pode ser feita a partir de um gráfico: o mais adequado é termos uma *teoria acerca do fenômeno físico* que descreva qual é o padrão que os pontos devem seguir, e usar um gráfico para determinar se tal descrição é coerente. Verificaremos posteriormente como determinar se uma teoria é plausível ou não, por hora vamos nos preocupar em determinar a *melhor reta* que ajusta um conjunto de dados.

Sempre que tivermos um conjunto de dados, podemos calcular a melhor reta que o representa através de um processo de *regressão linear*. Este processo consiste em aplicar um método matemático que tome os dados experimentais e calcule os coeficientes linear A e angular B para a equação da reta:

$$y = A + Bx. \quad (8.1)$$

Mínimos quadrados

² John R. Taylor. *An Introduction to Error Analysis*. 2nd Edition. University Science Books, 1997. ISBN: 0-935702-75-X

O método utilizado para obter tais coeficientes é o de *mínimos quadrados*. Nele, são encontrados os coeficientes de forma a minimizar o quadrado da distância entre os pontos experimentais e a “melhor reta”. É possível mostrar², utilizando técnicas de cálculo, que para minimizarmos a soma do quadrado das distâncias entre os pontos e a melhor reta, os coeficientes linear e angular são dados por

$$A = \frac{\sum x_i^2 \sum y_i - \sum x_i \sum x_i y_i}{N \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \quad (8.2)$$

$$B = \frac{N \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{N \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2}. \quad (8.3)$$

onde as somas se dão sobre todas as medidas x_i e y_i , N representa o número de medidas, e as médias das medidas para as variáveis x e y são representadas por $\langle x \rangle$ e $\langle y \rangle$, respectivamente. Após fazer a regressão, podemos utilizar os coeficientes para traçar as *retas de tendência* nos gráficos³.

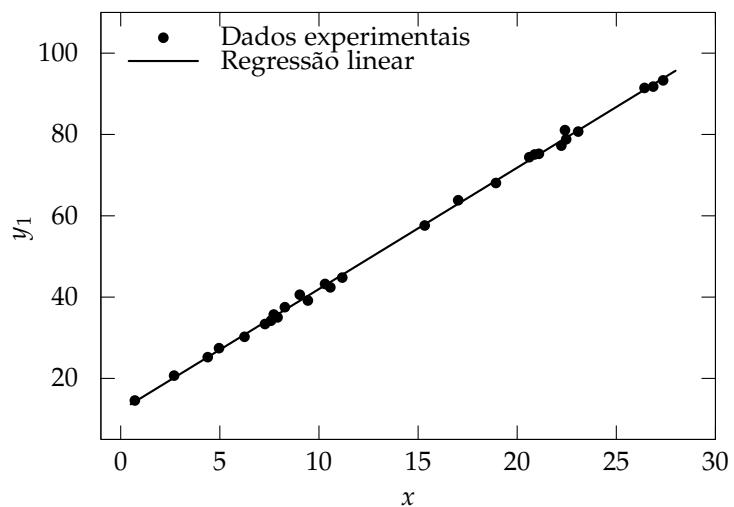
Ao fazermos o processo de regressão linear, a calculadora também calculará o *coeficiente de correlação linear r*, dado por

$$r = \frac{\sum (x_i - \langle x \rangle)(y_i - \langle y \rangle)}{\sqrt{\sum (x_i - \langle x \rangle)^2 \sum (y_i - \langle y \rangle)^2}}. \quad (8.4)$$

Tal coeficiente pode ser interpretado como um “índice de confiança” e geralmente é calculado ao quadrado, pois seus valores podem variar entre -1 e 1 . Quanto mais próximo r for de ± 1 , menor é a dispersão dos pontos em relação ao comportamento retilíneo, ou seja, maiores são as chances de que o fenômeno estudado e que deu origem aos dados siga uma relação linear. Este número geralmente se parece com algo como $r^2 = 0,999\,98$, $r^2 = 0,997$, $r^2 = 0,990$, etc., quando os dados são altamente lineares e relativamente abundantes. Se a dispersão em relação ao comportamento linear for grande e forem poucos os pontos, r^2 pode cair para $0,7$, ou valores menores.

³ Quando tais retas forem calculadas, adicione as equações resultantes aos gráficos.

Figura 8.1: Exemplo de regressão linear. A reta é dada por $y(x) = 2,984\,480\,401x + 12,140\,462\,64$, $r^2 = 0,998\,901\,256$.



Interpretação dos coeficientes angular e linear

A ideia por trás do cálculo da melhor reta é estabelecer quais seriam os coeficientes mais adequados para uma relação linear que descreve o fenômeno estudado. *Esses coeficientes são importantes pois estão, em geral, ligados a constantes físicas cujo valor estamos interessados em medir.* Além disso, esse processo é mais preciso do que simplesmente calcular o valor dos coeficientes da reta associados aos pontos medidos e depois fazer uma média.

Para dados da posição em função do tempo no caso de um corpo que se move com velocidade constante, por exemplo, esperamos uma relação entre os valores de posição e os valores de tempo de forma que

$$x = x_0 + vt. \quad (8.5)$$

Se fizermos uma regressão linear dos dados experimentais obtidos para a posição em função do tempo, verificamos ao comparar a equação acima com a equação da reta que

$$y = x, \quad (8.6)$$

$$x = t \quad (8.7)$$

$$A = x_0 \quad (8.8)$$

$$B = v. \quad (8.9)$$

Verificamos, portanto, que os coeficientes A e B estão relacionados a parâmetros físicos que temos interesse em calcular.

8.2 Lei de Hooke

Se usarmos uma corda para pendurar uma caixa ao teto de uma sala e passarmos a colocar objetos em tal caixa, não temos nenhuma indicação visual de qual é a força exercida pela corda. Para determinarmos tal força, poderíamos aferir a massa de cada objeto antes de os colocar na caixa e assim teríamos condições de calcular o valor da força exercida pela corda através da Segunda Lei de Newton.

Para uma mola, se realizarmos o mesmo procedimento, verificamos que ele sofre uma distensão *distensão gradual* à medida que sustenta um peso maior. Fazendo um *diagrama de corpo livre* (Figura 8.3), sabendo ainda que a aceleração do sistema é zero em uma condição de equilíbrio, concluímos que a força exercida pela mola sobre a caixa é igual em módulo e tem direção contrária à força peso da caixa (juntamente com sua carga):

$$F_{R,y} = ma_y \quad (8.10)$$

$$F_{e,y} + P_y = 0 \quad (8.11)$$

$$F_e - P = 0 \quad (8.12)$$

$$F_e = P. \quad (8.13)$$

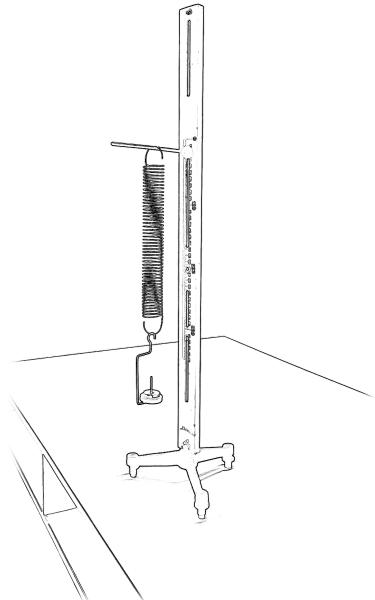


Figura 8.2: Aparato para a verificação da distensão de um mola em função da massa por ela suportada.

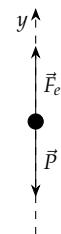


Figura 8.3: Diagrama de corpo livre para o corpo sustentado pela mola quando em equilíbrio.

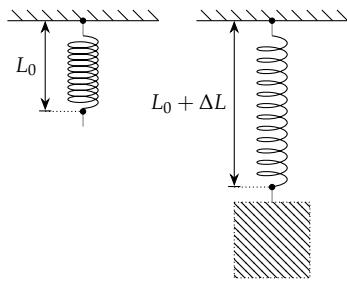


Figura 8.4: A distensão ΔL da mola é proporcional à força elástica exercida por ela.

Verificando ainda a distensão ΔL da mola, podemos relacionar uma maior distensão a uma carga maior na caixa, isto é, quanto maior a força peso dos objetos pendurados na mola, maior a distensão. Experimentalmente, verifica-se que a relação entre o peso aplicado à mola e sua distensão são *diretamente proporcionais*:

$$\Delta L \propto P. \quad (8.14)$$

Podemos então escrever para o módulo da **força elástica** F_e

$$F_e \propto \Delta L. \quad (8.15)$$

Podemos escrever a relação acima como uma igualdade introduzindo uma constante de proporcionalidade k :

$$F_e = k\Delta L. \quad (8.16)$$

O resultado acima é conhecido como *Lei de Hooke*, em homenagem ao físico inglês Robert Hooke, que o verificou em 1660. Tal relação, no entanto, só é válida para um intervalo de distensões da mola. As distensões dentro deste limite são denominadas *elásticas* e não deformam a mola permanentemente, caso contrário ao das distensões *plásticas*. Apesar de a validade da Lei de Hooke ser limitada, ela é o modelo mais comum ao se analisar a resposta de um meio a uma deformação e pode ser utilizada como uma primeira aproximação mesmo para casos mais complexos.

Outro ponto que devemos considerar é o que acontece quando *comprimimos* a mola. Se exercermos uma força conhecida, é possível verificar experimentalmente que a distensão sofrida pela mola segue a mesma relação linear dada pela Equação (8.16), com a mesma constante de proporcionalidade. Se considerarmos que a mola é helicoidal — como a mostrada na Figura 8.2 —, sendo que executamos deslocamentos somente na direção do próprio eixo da mola, podemos escrever uma relação vetorial que denota a direção e o sentido da força tanto para o caso da distensão, quanto para o caso da compressão da mola:

$$\vec{F}_e = -k\vec{\Delta r}. \quad (8.17)$$

Note que o sinal negativo implica em uma força que tem sempre o sentido oposto àquele que submetemos a mola, ou seja, a mola sempre exerce uma força no sentido de *restaurar seu comprimento original*.⁴ Se optarmos por usar um sistema de referência, podemos colocar um dos eixos na direção do eixo da própria mola. Se nomearmos tal eixo como x , temos que

$$F_{e,x} = -k\Delta x \quad (8.18)$$

$$F_e = -k\Delta x, \quad (8.19)$$

⁴ Devido a isso, a força elástica denominada como uma *força restauradora*.

⁵ Note que se $\Delta\vec{r}$ aponta na direção do eixo x , então $\Delta r = |\Delta\vec{r}| \equiv \Delta x$, mas a notação que todo mundo utiliza é a da Equação (8.19). Só estou mostrando de onde essa forma vem.

onde usamos o fato de que o vetor \vec{F}_e aponta diretamente na direção de x , o que implica em $F_{e,x} \equiv F_e$ e Δx representa a projeção do vetor $\Delta\vec{r}$ na direção do eixo x .⁵

8.3 Experimento: Determinação da distensão de uma mola em função da massa suspensa

Visando verificar a Lei de Hooke, vamos determinar a distensão de uma mola helicoidal posicionada verticalmente em função da massa de um conjunto de anilhas sustentada pela mola e em repouso. As anilhas serão ligadas à mola através de um gancho, permitindo que as depositemos uma a uma, verificando a distensão obtida para cada valor de massa suspensa. Note que devemos tomar o cuidado de verificar a distensão da mola sempre quando as anilhas suspensas se encontram em equilíbrio.

8.3.1 Objetivos

- Verificar a lineariedade da distensão de uma mola em resposta à força peso dos objetos pendurados nela.
- Relacionar as variáveis da Lei de Hooke às da equação da reta $y = A + Bx$.
- Calcular a constante k da mola;
- Elaborar um gráfico $F_e \times \Delta x$ dos pontos experimentais e adicionar a ele a reta calculada através da regressão linear;

8.4 Material Necessário

- Suporte vertical graduado com base e travessa horizontal;
- Molas diversas;
- Gancho e anilhas;
- Balança;
- Régua.

8.5 Procedimento Experimental

1. Utilize o suporte para fixar a mola por uma extremidade e prenda o gancho à outra extremidade.
2. Marque dois pontos de referência,⁶ um na parte superior e outro na parte inferior da mola (veja a Figura 8.5). Meça a distância L_0 entre eles e anote na Tabela 8.1.
3. Verifique a massa de uma anilha, juntamente com o gancho, e os suspenda na mola. Verifique a nova distância L entre os pontos de referência. Anote na Tabela 8.1 os valores da massa suspensa m_s e a distância L obtidas.
4. Afira a massa de outra anilha e a coloque no gancho. Verifique a nova distância L entre os pontos de referência. Anote na Tabela 8.1 o novo valor da massa suspensa m_s e o novo valor da distância L .

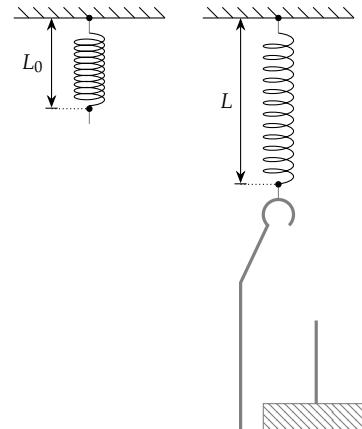


Figura 8.5: Para que possamos determinar o valor de ΔL , devemos escolher dois pontos fixos de referência. Note que $\Delta L = L - L_0$.

⁶ Como estamos interessados em determinar a distensão ΔL da mola, quaisquer dois pontos que permitam determinar tal valor são adequados. Podemos, por exemplo, colocar o ponto mais baixo na parte inferior do gancho, uma vez que a altura do gancho é constante e não influí no valor de ΔL .

5. Repita o passo acima adicionando anilhas ao gancho uma a uma. Procure conseguir o máximo número de pontos experimentais possível, porém sem submeter a mola a deformações irreversíveis.

Lei de Hooke

Turma: _____ Data: _____

Aluno(a): _____	Matrícula: _____

8.6 Questionário

Questão 1. (2 pontos) Preencha as colunas de dados das tabelas com o número adequado de algarismos significativos e unidades.

Questão 2. (2 pontos) Elabore um gráfico de⁷ $F_e \times \Delta x$ para os dados experimentais obtidos e adicione a ele a reta calculada através da regressão linear.

Questão 3. (4 pontos) Relacione as variáveis da Lei de Hooke àquelas da equação da reta e interprete o significado das constantes A e B . Determine a constante da mola através do coeficiente angular.

Questão 4. (2 pontos) Determine o valor de r^2 . O valor encontrado demonstra compatibilidade entre os dados experimentais e a hipótese de dependência linear da distensão com a força aplicada à mola?

⁷ Apesar de o mais adequado ser um gráfico de $\Delta x \times m$, pois controlamos a massa suspensa (m é, portanto, a variável independente) e medimos a distensão correspondente da mola (Δx é então a variável dependente), para fins didáticos é melhor elaborarmos um gráfico de $F_e \times \Delta x$.

8.7 Tabelas

Tabela 8.1: Valores de posição em função da massa pendurada na mola.

9 Leis de Newton

Realizaremos um experimento no qual dois corpos estão ligados por um fio, sendo que um deles pode se deslocar livremente no eixo vertical, enquanto o outro se desloca no eixo horizontal. Através desse aparato, poderemos calcular a aceleração através das Leis de Newton — assumindo que podemos determinar as forças que atuam sobre o sistema, exceto pelas forças de atrito e arrasto, que devem ser desprezíveis —. Além disso, seremos capazes de calcular a aceleração através de informações cinemáticas (distância percorrida e tempo correspondente), permitindo uma comparação entre os valores obtidos. Utilizaremos os conceitos de medidas, algarismos significativos, gráficos, regressão linear, e linearização.

9.1 Leis de Newton

Ao estudar o movimento dos corpos, verificamos que são necessárias três grandezas para descrever o movimento: a *posição*, a *velocidade* e a *aceleração*. Além disso, sabemos que estas três grandezas estão relacionadas através de

$$\vec{v} = \frac{d\vec{r}}{dt} \quad (9.1)$$

$$\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt}. \quad (9.2)$$

Por outro lado, podemos relacionar o movimento de um corpo às forças que atuam nele através das leis de Newton, que podem ser enunciadas como:

1^aLei Se nenhuma força resultante atua sobre um corpo, sua velocidade não pode mudar, ou seja, o corpo não pode sofrer uma aceleração.

2^aLei A força resultante que age sobre um corpo é igual ao produto da massa do corpo pela sua aceleração, isto é,

$$\vec{F}_{\text{res}} = m\vec{a}. \quad (9.3)$$

3^aLei Quando dois corpos interagem, as forças que cada corpo exerce sobre o outro são sempre iguais em módulo e têm sentidos opostos.

Do ponto de vista do estudo do movimento de um corpo submetido a uma ou mais forças, as leis de Newton transferem parte do problema para a determinação de características das forças envolvidas no problema. Devido a isto, é importante conhecermos algumas características das forças mais comuns:

Força Peso A força peso a força gravitacional exercida sobre um corpo próximo à superfície da Terra, sempre em direção ao centro da Terra e com módulo dado por

$$P = mg. \quad (9.4)$$

A origem de tal expressão é a lei da gravitação universal:

$$F_g = G \frac{M_T m}{r_T^2}, \quad (9.5)$$

onde $G = 6,673 \cdot 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{kg}^2$ é a constante da gravitação, M_T é a massa da Terra e r_T é o raio da Terra. Como esse último varia pouco (percentualmente), podemos reescrever a expressão acima como

$$F_g = \left[\frac{GM_T}{r_T^2} \right] m \quad (9.6)$$

$$= mg, \quad (9.7)$$

onde $g \approx 9,8 \text{ m/s}^2$.

Força Normal A força normal ganha esse nome pois ela é sempre *normal*, ou seja, *perpendicular* à superfície de interação entre dois corpos quaisquer. Quando colocamos um objeto sobre uma mesa, por exemplo, ele estará sujeito à força peso — devida a atração gravitacional exercida pela Terra sobre o objeto — e a uma força normal exercida pela mesa sobre o objeto.

Se a mesa for completamente horizontal, a força será dirigida para cima. Sobre o módulo da força, no entanto, não podemos afirmar muita coisa: sabemos que nesse tipo de situação o objeto deve permanecer parado sobre a mesa, de onde concluímos que a normal tem o mesmo módulo que o peso. Se, entretanto, o objeto for uma caixa, poderemos colocar outros objetos dentro dele e assim aumentaremos a força gravitacional exercida sobre o conjunto. Nessa situação observamos que o sistema continua em repouso, de onde concluímos que a força normal aumentou. Podemos afirmar, portanto, que a força normal pode variar em resposta a componente da força peso que é perpendicular à superfície. Por outro lado, se colocarmos uma carga exageradamente grande sobre uma mesa fraca, verificamos que a mesa quebra, portanto concluímos que a força normal deve ter um valor máximo.

Em situações onde o objeto sobre o qual a força normal age pode ser submetido a acelerações — dentro de um elevador, por exemplo — temos uma situação ainda mais complexa. O valor da força normal passa também a variar dependendo do estado de aceleração do sistema elevador-objeto. Percebe-se, portanto, que a determinação exata do valor do módulo da força normal requer uma análise aprofundada da situação em questão.

Tensão A tensão tem um comportamento bastante similar ao da força normal. Se prendermos um fio ao teto de uma sala e pendurarmos um balde, verificamos que o balde permanecerá em repouso.

Portanto, sabemos que a tensão equilibra a força peso. Se enchermos o balde com água, aumentamos a massa do conjunto e, consequentemente, a força peso. Ao fazer isso, no entanto, não notamos nenhum deslocamento do balde (se o fio for inextensível). Se aumentarmos muito a carga do balde, podemos fazer com que o fio atinja e ultrapasse seu valor máximo de tensão, fazendo com que ele se rompa.

Da mesma forma que com a força normal, se tivermos uma aceleração do sistema, precisaremos levá-la em consideração ao calcular o valor da tensão. Portanto, também precisamos de uma análise aprofundada da situação em questão.

9.2 Máquina de Atwood

Através dos conceitos expostos acima, podemos fazer uma análise do movimento horizontal de um carrinho em um trilho de baixo atrito, sendo que ele é puxado através de um fio por um corpo suspenso. A Figura 9.1 mostra o aparato experimental desse experimento. Nessa configuração, o aparato equivale a uma *Máquina de Atwood*. Vamos analisar esse sistema de duas formas distintas, para que possamos comparar os resultados obtidos com cada uma delas.

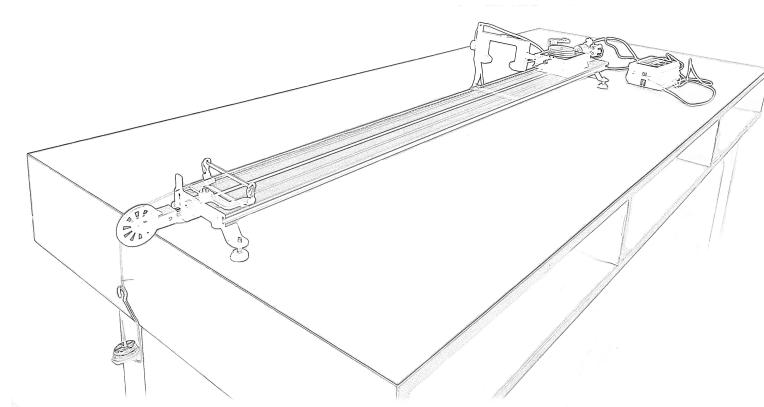


Figura 9.1: Objeto se movendo horizontalmente em um trilho, submetido a uma aceleração devida ao objeto que cai.

9.2.1 Análise através das Leis de Newton

Analizando cada um dos objetos separadamente através da segunda lei de Newton:

Bloco 1: Aplicando a Segunda Lei de Newton para cada eixo:

Eixo x_1 :

$$F_{R,x_1} = m_1 a_{1,x_1} \quad (9.8)$$

$$T = m_1 a_{1,x_1}. \quad (9.9)$$

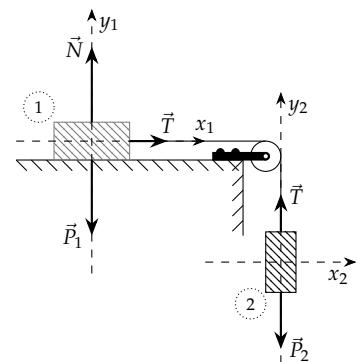


Figura 9.2: Neste sistema, os blocos têm acelerações em eixos diferentes, porém — devido ao fato de que eles estão ligados por um fio inextensível —, temos que $a_{1,x} = -a_{2,y}$.

Eixo y_1 :

$$F_{R,y_1} = m_1 a_{1,y_1} \quad (9.10)$$

$$N_1 - P_1 = m_1 a_{1,y_1} \quad (9.11)$$

$$N_1 - P_1 = 0 \quad (9.12)$$

$$N_1 = P_1. \quad (9.13)$$

Bloco 2: Novamente, aplicando a Segunda Lei de Newton para cada eixo:

Eixo x_2 : Não há nenhuma força/componente nesse eixo.

Eixo y_2 :

$$F_{R,y_2} = m_2 a_{2,y_2} \quad (9.14)$$

$$T - P_2 = m_2 a_{2,y_2}. \quad (9.15)$$

Para determinar a aceleração e a tensão, precisamos resolver o sistema de equações formado pelas expressões (9.9) e (9.15). No entanto, temos três incógnitas: $a_{1,x}$, $a_{2,y}$ e T . Para que possamos resolver este sistema, precisamos de mais uma equação: a relação entre as acelerações. A aceleração do bloco 1 será no sentido positivo do eixo x_1 , enquanto a aceleração do bloco 2 será no sentido negativo do eixo y_2 . Se o fio é inextensível, podemos afirmar que o módulo dessas duas acelerações é o mesmo, o que nos leva à equação

$$a_{1,x} = -a_{2,y}. \quad (9.16)$$

Assim

$$\begin{cases} T = m_1 a_{1,x_1} \\ T - P_2 = m_2 a_{2,y_2} \\ a_{1,x} = -a_{2,y} \end{cases} \quad (9.17)$$

Se fizermos $a_{1,x_1} \equiv a$, pois estamos determinando o módulo da aceleração de cada bloco, podemos reescrever o sistema acima como

$$\begin{cases} T = m_1 a \\ T - P_2 = -m_2 a, \end{cases} \quad (9.18)$$

o que resulta, a partir da soma da primeira equação com o negativo da segunda equação, em

$$T - T + P_2 = m_1 a + m_2 a \quad (9.19)$$

$$m_2 g = (m_1 + m_2) a. \quad (9.20)$$

Finalmente, temos para a aceleração¹

$$a = \frac{m_2}{m_1 + m_2} g. \quad (9.21)$$

Para obtermos a tensão, basta retornar às equações do sistema e substituir o resultado para a aceleração. Fazendo isso com a primeira equação do sistema, temos

$$T = m_1 a \quad (9.22)$$

$$= \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} g. \quad (9.23)$$

Portanto, conhecendo o valor das massas dos dois objetos, temos condições de calcular a aceleração do sistema.

¹ Note que a fração é adimensional e que g tem dimensão de aceleração. Consequentemente, o resultado tem as dimensões corretas.

9.2.2 Análise através das equações da cinemática.

Uma outra forma de análise do sistema é através das equações da cinemática. Se formos capazes de medir a distância percorrida por qualquer um dos blocos e pudermos cronometrar o tempo necessário para realizar tal deslocamento, podemos extrair a aceleração dos dados utilizando a fórmula para o deslocamento de um objeto submetido a uma aceleração constante, isto é,

$$\Delta x = v_0 t + \frac{1}{2} a t^2 \quad (9.24)$$

Como podemos iniciar a cronometragem assim que o objeto começa a se mover, podemos eliminar a velocidade inicial v_0 . Assim

$$\Delta x = \frac{1}{2} a t^2. \quad (9.25)$$

Podemos calcular a aceleração a partir de um valor qualquer de deslocamento e do tempo correspondente. No entanto, o mais adequado é realizar uma série de medidas e utilizar o método dos mínimos quadrados para o conjunto de dados linearizado. Fazendo uma linearização, obtemos a seguinte relação entre a equação da reta e a equação acima:

$$y = \Delta x \quad (9.26)$$

$$A = 0 \quad (9.27)$$

$$B = a/2 \quad (9.28)$$

$$x = t^2. \quad (9.29)$$

Podemos então calcular o coeficiente angular através de uma regressão linear dos dados obtidos para o deslocamento e para o tempo ao quadrado e obter um valor de aceleração independente daquele calculado através das leis de Newton. Isso possibilitará que comparemos os valores obtidos, testando assim a validade de tais leis.

9.3 Experimento

Vamos usar o aparato descrito na Seção 9.2 para determinar a aceleração através dos valores para a massa suspensa e para a massa do carrinho que deslisa sobre o trilho. Além disso, vamos verificar o tempo necessário para que o carrinho percorra diversos valores de distância, sempre partindo do repouso, o que nos permitirá determinar a aceleração também através da cinemática. Poderemos então comparar os valores obtidos através dos dois métodos, verificando a validade das Leis de Newton.

9.3.1 Objetivos

- Verificar a validade das Leis de Newton;
- Linearizar o conjunto de dados obtidos e obter os valores de A e B da equação da reta correspondente;

- Relacionar as variáveis cinemáticas às constantes da equação da reta;
- Calcular a aceleração do sistema através do valor do coeficiente angular (B) da reta;
- Elaborar um gráfico $\Delta x \times t$ dos pontos experimentais;
- Elaborar um gráfico $\Delta x \times t^2$ dos pontos experimentais e adicionar a ele a reta obtida através da regressão linear.

9.4 Material Necessário

- Conjunto de trilho, carrinho, sensores e cronômetro;
- Gancho e anilhas;
- Balança;

9.5 Procedimento Experimental

1. Afira as massas do carrinho que se desloca sobre o trilho e do conjunto formado pelo gancho e pelas anilhas. Anote os valores obtidos na Tabela 9.1.
2. Ligue o cronômetro e acione a bobina do eletroímã.
3. Posicione o carrinho em contato com o eletroímã.
4. Posicione o sensor a uma distância de cerca de 8,00 cm do carrinho.
5. Libere o carrinho e anote os valores obtidos de tempo e de distância percorrida na Tabela 9.1.
6. Desloque o sensor distanciando-o mais 4,00 cm da posição inicial do carrinho.
7. Acione novamente o eletroímã e reposicione o carrinho na posição inicial.
8. Libere o carrinho novamente e anote os novos valores de tempo e de distância percorrida na Tabela 9.1.
9. Repita os itens acima extraíndo tantos dados quanto possível. Observe que conforme o conjunto de anilhas desce, ele eventualmente colide com o chão. **A colisão com o chão só pode acontecer após o carrinho ter passado pelo segundo sensor.** Portanto, o valor máximo de distância entre os sensores estará limitado por esse fator.

Leis de Newton

Turma: _____ Data: _____

Aluno(a): _____	Matrícula: _____

9.6 Questionário

Questão 1. (2 pontos) Preencha as colunas de dados das tabelas com o número adequado de algarismos significativos e unidades.

Questão 2. (2 pontos) Elabore² um gráfico $\Delta x \times t$ dos pontos experimentais e um gráfico $\Delta x \times \tau$, onde $\tau = t^2$.

Questão 3. (4 pontos)

- Através dos gráficos da questão anterior, podemos verificar qual dos dois conjuntos de dados segue uma *tendência linear*.
- Para o conjunto de dados linear, obtenha os valores de A , B e r^2 da melhor reta correspondente, isto é, faça a regressão linear dos dados experimentais. Adicione essa reta ao gráfico correspondente e coloque a equação da reta, juntamente com o coeficiente r^2 na legenda.
- Relacione as variáveis cinemáticas às constantes da equação da reta e calcule a aceleração do sistema através do coeficiente angular B .

Questão 4. (2 pontos) Compare o valor o valor obtido para a aceleração com o valor dado pelas leis de Newton através do *erro percentual* dado pela expressão³

$$E\% = \left| \frac{a - a_{\text{Ref}}}{a_{\text{Ref}}} \right| \times 100, \quad (9.30)$$

onde a_{Ref} é o valor obtido para a aceleração através das Leis de Newton e a é o valor obtido através do coeficiente B da regressão linear.

² Na verdade, em ambos os casos o deslocamento Δx é a variável independente. Por questões didáticas, no entanto, estamos optando por tratar o tempo como variável independente.

³ A expressão para o erro percentual é geral e costuma ser escrita como

$$E\% = \left| \frac{x - x_{\text{Ref}}}{x_{\text{Ref}}} \right| \times 100,$$

onde x é uma medida qualquer que queremos comparar com um valor de referência x_{Ref} .

9.7 Tabelas

Tabela 9.1: Valores de tempo e deslocamento para o MRUV.

Massas

Carrinho

Gancho e anilhas

Dados experimentais

x_i

x_f

t

Valores calculados

Δx

t^2

10 Arrasto

Realizaremos um experimento para a determinação da velocidade terminal de uma esfera que se move em um fluido dentro de um tubo que faz um ângulo com a horizontal. Através de uma análise dos dados obtidos, verificaremos qual é a dependência da força de arrasto na velocidade. Para isso, veremos as expressões para a força de arrasto com dependência linear e quadrática na velocidade, verificando também como obter a expressão para a velocidade terminal em função do ângulo de inclinação. Utilizaremos os conceitos de medidas, algarismos significativos, gráficos, regressão linear, e linearização.

10.1 Força de Arrasto

Quando nos deslocamos em uma piscina, verificamos que há uma grande força que se opõe ao nosso movimento. Mesmo ao nos deslocarmos no ar, um fluido muito menos denso que a água, podemos perceber que em velocidades elevadas existe o mesmo tipo de força que se opõe ao movimento.

Em ambos os casos é possível perceber que há uma relação entre a velocidade do deslocamento e a intensidade da força. A descrição dsta força — que recebe o nome de *Força de Arrasto* — é, no entanto, bastante complicada. Em deslocamentos no ar, com velocidades moderadas, a expressão para a força é dada por

$$F_a = \frac{1}{2} C \rho A v^2, \quad (10.1)$$

onde

- C é um parâmetro adimensional conhecido como *coeficiente de arrasto* e cujo valor é determinado experimentalmente. Seu valor depende de propriedades como a forma e as características da superfície do objeto. Além disso, seu valor pode variar com a velocidade. Seus valores típicos estão compreendidos na faixa entre 0,4 e 1,0.
- A é a área de seção reta do objeto. Tal área pode ser interpretada como a sombra do objeto ao ser iluminado por uma fonte de luz distante e cuja direção dos raios luminosos seja a mesma do movimento.
- ρ é a densidade do meio onde o objeto se desloca.
- Finalmente, v^2 representa o quadrado da velocidade do objeto em relação ao meio.

Esse conjunto de parâmetros às vezes é escrito de uma maneira compacta utilizando a notação $b_2 = C\rho A/2$ e a força de arrasto como

$$F_a = b_2 v^2. \quad (10.2)$$

Muitas vezes, porém, temos fluidos e/ou regimes de velocidade para os quais a expressão acima falha. A força de arrasto que atua sobre o casco de um navio, por exemplo, é em geral descrita através da equação¹

$$F_a = 6\pi\eta Rv \quad (10.3)$$

$$= b_1 v. \quad (10.4)$$

Podemos dizer, portanto, que existem pelo menos duas hipóteses para a descrição da força de arrasto que age sobre um corpo. Vamos analisar um experimento e realizar um teste para determinar qual hipótese é a mais adequada.

10.2 Força de arrasto e velocidade terminal

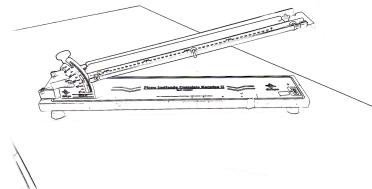


Figura 10.1: Plano inclinado com tubo contendo fluido e uma esfera de aço que pode se deslocar.

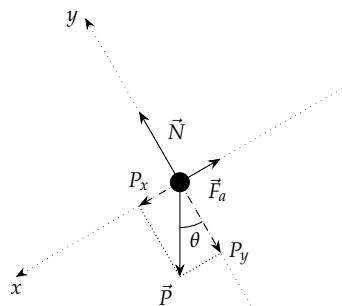


Figura 10.2: Diagrama de corpo livre da esfera que se desloca dentro do tubo.

Vamos analisar o movimento de uma esfera que se desloca dentro de um tubo preenchido com um fluido (água) e está sujeito a uma força de arrasto. Vamos considerar que o tubo está inclinado de um ângulo θ em relação à horizontal. Nesse caso, atuam sobre a esfera a força peso, a força normal e a força de arrasto (veja a Figura 10.2).

Verificamos para o eixo y que a força normal deve ser equilibrada pela componente y da força peso, pois o objeto não se desloca no eixo y e, portanto, sua aceleração deve ser zero. Já para o eixo x , verificamos que

$$F_{R,x} = ma_x \quad (10.5)$$

$$P_x - F_{a,x} = ma_x. \quad (10.6)$$

Substituindo $F_a = b_n v^n$, onde $n = 1$ ou 2 — de acordo com as hipóteses discutidas na seção anterior —, temos

$$P_x - b_n v^n = ma_x. \quad (10.7)$$

Verificamos então que conforme a velocidade do objeto aumenta, a força de arrasto também aumenta. Isso dá origem a uma *velocidade limite*, isto é, uma velocidade máxima para a qual a força de arrasto equilibra completamente a componente da força peso na direção do eixo x . Temos então uma aceleração nula e, portanto, uma velocidade constante. O valor da velocidade terminal pode ser calculado através de

$$P_x - b_n v_t^n = 0, \quad (10.8)$$

ou, substituindo $P_x = Mg \sin \theta$,

$$v_t^n = \frac{Mg}{b_n} \sin \theta. \quad (10.9)$$

A partir do resultado acima, vemos que a velocidade terminal só depende do ângulo θ de inclinação do tubo, uma vez que os demais

¹ As constantes b_1 e b_2 em geral não têm o mesmo valor.

parâmetros são constantes. Substituindo os valores de n na equação acima, temos duas hipóteses

$$v_t = \frac{Mg}{b_1} \operatorname{sen} \theta, \quad \text{Hipótese 1} \quad (10.10)$$

$$v_t^2 = \frac{Mg}{b_2} \operatorname{sen} \theta, \quad \text{Hipótese 2.} \quad (10.11)$$

Como a velocidade terminal é constante, podemos estabelecer uma posição inicial e uma posição final no tubo cujo tempo de deslocamento possa ser cronometrado. Utilizando uma distância Δx fixa, temos então que

$$v_t = \Delta x / \Delta t. \quad (10.12)$$

É importante notar que o objeto já deve ter atingido a velocidade limite antes da posição inicial para que a equação acima seja válida.

10.2.1 Linearização e teste das duas hipóteses

Para decidirmos qual das hipóteses acima melhor descreve a força de arrasto no experimento, vamos utilizar o coeficiente r^2 . Para tanto, vamos comparar as duas hipóteses com a equação da reta:

Hipótese 1: Temos nesse caso a seguinte relação entre a equação que rege o fenômeno e a equação da reta:

$$y = v_t \quad (10.13)$$

$$A = 0 \quad (10.14)$$

$$B = Mg/b_1 \quad (10.15)$$

$$x = \operatorname{sen} \theta \quad (10.16)$$

Hipótese 2: Nesse caso, temos

$$y = v_t^2 \quad (10.17)$$

$$A = 0 \quad (10.18)$$

$$B = Mg/b_2 \quad (10.19)$$

$$x = \operatorname{sen} \theta \quad (10.20)$$

10.3 Experimento

Considerando o movimento de uma esfera em um plano inclinado e sujeita a uma força de arrasto, vamos verificar o tempo necessário para que a ela percorra uma distância preestabelecida, porém para diversos ângulos de inclinação distintos. Para que possamos determinar a velocidade de maneira simples, é necessário que a esfera tenha atingido a velocidade terminal antes de passar pela posição que marca o início do intervalo para o qual mediremos a distância e o tempo. Isso significa que a esfera deve ser solta a partir de um ponto que preceda o ponto inicial por alguns centímetros.²

² Como a esfera tem massa pequena e o fluido é razoavelmente viscoso, a distância necessária é pequena, por volta de 3,00 cm são suficientes.

10.3.1 Objetivos

- Verificar a relação entre a força de arrasto e a velocidade;
- Linearizar os conjuntos de dados obtidos e obter os valores de A e B das equações da retas correspondentes;
- Elaborar um gráfico $v_t \times \sin \theta$ dos pontos experimentais e adicionar a ele a reta obtida através da regressão linear;
- Elaborar um gráfico $v_t^2 \times \sin \theta$ dos pontos experimentais e adicionar a ele a reta obtida através da regressão linear.

10.4 Material Necessário

- Plano inclinado;
- Cronômetro;
- Ímã;
- Régua.

10.5 Procedimento Experimental

1. Ajuste o plano inclinado para um ângulo de $5,0^\circ$.
2. Estabeleça o x_i como 10,00 cm.
3. Estabeleça o x_f como 40,00 cm.
4. Use o ímã para levar a esfera até a posição mais alta do tubo.
5. Solte a esfera e cronometre o tempo necessário para atravessar a distância entre x_i e x_f . Anote o valor na tabela.
6. Repita a tomada de tempo mais duas vezes para este ângulo.
7. Aumente o ângulo em $5,0^\circ$ e repita os passos acima. Realize este procedimento até atingir o ângulo de $40,0^\circ$.

Arrasto

Turma: _____ Data: _____

Aluno(a): _____ Matrícula: _____

10.6 Questionário

Questão 1. (2 pontos) Preencha as colunas de dados das tabelas com o número adequado de algarismos significativos e unidades.

Questão 2. (3 pontos) Elabore um gráfico $v_t \times \sin \theta$ dos pontos experimentais e um gráfico de $v_t^2 \times \sin \theta$.

Questão 3. (3 pontos) Através dos gráficos elaborados no item anterior, para ambos os conjuntos de dados, obtenha os valores de A , B e r^2 da melhor reta correspondente (a reta da regressão linear). Adicione essa reta ao gráfico e coloque a equação da reta, juntamente com o coeficiente r^2 na legenda.

Questão 4. (2 pontos) Através da análise do coeficiente de dispersão linear r^2 , indique qual das hipóteses discutidas na Seção 10.2 melhor descreve o fenômeno.

10.7 Tabelas

Posições inicial e final

x_i	
x_f	

Dados experimentais

t_1	t_2	t_3	$\langle t \rangle$	θ

Dados para o gráfico

v_t	$\sin \theta$

Tabela 10.1: Dados para o movimento efetuado pela esfera sob ação da gravidade e do arrasto.

11 Atrito

Realizaremos dois experimentos com o intuito de determinar os coeficientes de atrito estático e cinético entre algumas superfícies. Para a determinação do coeficiente de atrito estático, usaremos um plano com inclinação variável e determinaremos o ângulo de iminência de movimento. Já para a determinação do coeficiente de atrito cinético, verificaremos a aceleração de um bloco quando sujeito a uma tensão constante e a uma força de atrito que atua no sentido de retardar o movimento, permitindo que o coeficiente de atrito cinético seja determinado através das Leis de Newton. Utilizaremos os conceitos de medidas, algarismos significativos, gráficos, e regressão quadrática.

11.1 Regressão quadrática

Sempre que acreditamos que os dados experimentais seguem uma tendência linear, podemos utilizar uma regressão linear para determinar a reta que melhor descreve os dados. Em algumas situações, mesmo que os dados não tenham uma tendência linear, podemos obter uma tendência linear ao realizarmos uma mudança de variável. Em algumas situações, no entanto, nenhuma dessas dois cenários é viável. Nesses casos, devemos procurar outras formas funcionais para descrever os dados, sendo que para cada forma deve ser possível ajustar uma “melhor curva”.

Para o caso especial de polinômios de grau dois, isto é, para curvas com a forma

$$y = A + Bx + Cx^2, \quad (11.1)$$

os coeficientes podem ser calculados através de

$$\begin{pmatrix} \sum x_i^4 & \sum x_i^3 & \sum x_i^2 \\ \sum x_i^3 & \sum x_i^2 & \sum x_i \\ \sum x_i^2 & \sum x_i & n \end{pmatrix} \begin{pmatrix} C \\ B \\ A \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum x_i^2 y_i \\ \sum x_i y_i \\ \sum y_i \end{pmatrix}, \quad (11.2)$$

sendo que tal equação tem que ser resolvida para determinar o vetor $\vec{x} = (C, B, A)$. O coeficiente r^2 agora se torna uma medida da correlação quadrática, porém sua interpretação segue a mesma, sendo calculado através de

$$r^2 = 1 - \frac{\sum(y_i - Cx_i^2 - Bx_i - A)^2}{\sum(y_i - \langle y \rangle)^2}. \quad (11.3)$$

O cálculo dos coeficientes A , B , C , e r^2 através das equações acima é muito trabalhoso para ser feito manualmente, porém é algo relativamente simples de se implementar em um computador ou mesmo em uma calculadora. A maioria das calculadoras científicas e softwares com algum suporte a tratamento estatístico de dados disponibiliza métodos simples para determinar tais valores de maneira rápida.

11.2 Força de atrito

11.2.1 Determinação do coeficiente de atrito estático

Uma maneira simples de determinar o coeficiente de atrito estático entre dois tipos de superfícies consiste em utilizar um plano cuja inclinação pode ser alterada, sobre o qual apoiamos um bloco. Quando o plano for inclinado até que o bloco esteja na iminência de se mover, podemos analisar o sistema ainda como uma situação de equilíbrio.

Uma escolha razoável para o eixo x é adotá-lo como paralelo ao plano inclinado (Veja a Figura 11.2). Dessa forma o ângulo entre a força peso e o eixo y será o mesmo que aquele entre o plano inclinado e a horizontal. As demais forças estarão em um eixo somente. Aplicando a Segunda Lei de Newton aos eixos, temos:

Eixo x: Neste eixo temos, sabendo que $a_x = 0$,

$$F_{R,x} = ma_x \quad (11.4)$$

$$P_x + f_{at,x} + N_x = 0 \quad (11.5)$$

$$P \sin \theta - \mu_e N = 0 \quad (11.6)$$

$$mg \sin \theta - \mu_e N = 0 \quad (11.7)$$

$$mg \sin \theta = \mu_e N \quad (11.8)$$

Eixo y: Novamente, a aceleração é nula, o que nos leva a

$$F_{R,y} = ma_y \quad (11.9)$$

$$N_y + P_y + f_{at,y} = 0 \quad (11.10)$$

$$N = P \cos \theta \quad (11.11)$$

$$N = mg \cos \theta \quad (11.12)$$

Utilizamos acima o fato de que o ângulo entre o peso e o eixo y é igual ao ângulo θ entre a superfície do plano inclinado e a horizontal.

Substituindo a expressão acima para a força normal na Equação (11.8), obtemos

$$\mu_e mg \cos \theta = mg \sin \theta, \quad (11.13)$$

o que resulta em

$$\mu_e = \tan \theta. \quad (11.14)$$

Experimentalmente, basta elevar lentamente a inclinação do plano até que o bloco comece a deslizar. Registrando o ângulo para o qual o movimento inicia, temos um valor limite para o ângulo. Repetindo o procedimento algumas vezes, podemos determinar com alguma precisão qual é o ângulo para o qual temos iminência de movimento.

11.2.2 Determinação do coeficiente de atrito cinético

De um ponto de vista prático, o coeficiente de atrito cinético pode ser determinado através de uma análise em que medimos a aceleração a que um corpo sujeito à força de atrito cinético está sujeito. Se,

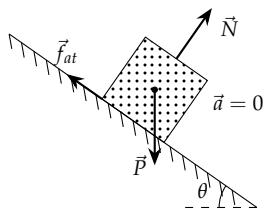


Figura 11.1: Bloco em equilíbrio devido à força de atrito sobre um plano inclinado.

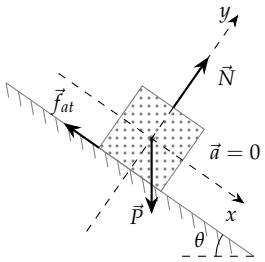


Figura 11.2: Sistema de referência para a análise do sistema.

por exemplo, tomarmos a Figura 11.3, na qual um bloco repousa sobre uma superfície horizontal e passa a ser puxado por uma tensão constante \vec{T} , estando também sujeito a uma força de atrito cinético \vec{f}_{at} , observaremos que ele sofre uma aceleração. Certamente tal aceleração será menor do que no caso em que não existe atrito, sendo que seu valor dependerá diretamente do coeficiente de atrito cinético μ_c entre a superfície de apoio e a superfície inferior do bloco.

Podemos determinar uma relação entre a e μ_c ao aplicarmos a Segunda Lei de Newton ao sistema:

Bloco 1: Aplicando a Segunda Lei de Newton para cada eixo:

Eixo x_1 :

$$F_{R,x_1} = m_1 a_{1,x_1} \quad (11.15)$$

$$T_x + N_x + P_{1,x} + f_{at,x} = m_1 a_{1,x_1} \quad (11.16)$$

$$T - f_{at} = m_1 a_{1,x_1}. \quad (11.17)$$

Eixo y_1 :

$$F_{R,y_1} = m_1 a_{1,y_1} \quad (11.18)$$

$$T_y + N_y + P_{1,y} + f_{at,y} = m_1 a_{1,y_1} \quad (11.19)$$

$$N_1 - P_1 = m_1 a_{1,y_1} \quad (11.20)$$

$$N_1 - P_1 = 0 \quad (11.21)$$

$$N_1 = P_1 \quad (11.22)$$

$$= m_1 g \quad (11.23)$$

Bloco 2: Novamente, aplicando a Segunda Lei de Newton para cada eixo:

Eixo x_2 : Não há nenhuma força/componente nesse eixo.

Eixo y_2 :

$$F_{R,y_2} = m_2 a_{2,y_2} \quad (11.24)$$

$$T_y + P_{2,y} = m_2 a_{2,y_2} \quad (11.25)$$

$$T - P_2 = m_2 a_{2,y_2}. \quad (11.26)$$

Para determinar uma relação entre a aceleração e o coeficiente de atrito cinético, precisamos resolver o sistema de equações formado pelas expressões (11.17) e (11.26). No entanto, temos três incógnitas: $a_{1,x}$, $a_{2,y}$ e T . Para que possamos resolver este sistema, precisamos de mais uma equação: a relação entre as acelerações dos dois blocos. Se considerarmos que a corda que liga os blocos é inextensível, temos que

$$a_{1,x} = -a_{2,y}. \quad (11.27)$$

Assim, se adotarmos $a_{x,1} \equiv a$, podemos reescrever o sistema como

$$\begin{cases} T - f_{at} = m_1 a \\ T - P_2 = -m_2 a, \end{cases} \quad (11.28)$$

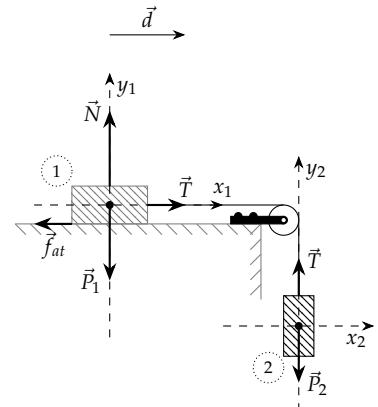


Figura 11.3: Bloco sujeito à força de atrito cinético durante um deslocamento.

o que resulta, a partir da soma da primeira equação com o negativo da segunda equação, em

$$T - \mu_c N_1 - T + P_2 = m_1 a + m_2 a \quad (11.29)$$

$$m_2 g - \mu_c m_1 g = (m_1 + m_2) a, \quad (11.30)$$

onde usamos

$$f_{at} = \mu_c N. \quad (11.31)$$

Finalmente, isolando μ_c obtemos

$$\mu_c = \frac{m_2}{m_1} - \frac{m_1 + m_2}{m_1} \cdot \frac{a}{g}. \quad (11.32)$$

Para que possamos determinar o valor do coeficiente de atrito, basta determinarmos a aceleração através da cinemática, além de determinar os valores de massa do bloco que repousa sobre a superfície horizontal e do corpo suspenso. De acordo com as equações cinemáticas para movimentos com aceleração constante, podemos escrever

$$x_f = x_i + v_i t + \frac{a}{2} t^2. \quad (11.33)$$

Se coletarmos dados para o tempo necessário para o bloco se deslocar entre uma posição fixa x_i e uma posição x_f cujo valor podemos variar, podemos determinar o valor da aceleração através de uma regressão quadrática, por meio do coeficiente C . É claro que se pudermos garantir que a velocidade inicial v_i é nula, então é possível utilizar uma mudança de variável $\tau = t^2$ e empregar uma regressão linear para determinar a aceleração. Na prática, no entanto, é muito difícil eliminar a velocidade inicial. Nesse caso, a regressão quadrática resulta em valores muito mais precisos para a aceleração do sistema.

11.3 Experimento

Inicialmente, vamos utilizar um plano com inclinação variável para determinar o coeficiente de atrito estático entre um bloco e uma superfície. Aumentaremos o ângulo de inclinação progressivamente, até que o bloco passe a deslizar. Considerando tal ângulo como uma aproximação para o ângulo de iminência de movimento, determinaremos o coeficiente de atrito estático através da Equação (11.14).

Em um segundo momento, vamos utilizar o aparato mostrado na Figura 11.4, cuja descrição esquemática é dada pela Figura 11.3 e cujas propriedades dinâmicas são descritas na Seção 11.2.2, para determinar o coeficiente de atrito cinético. Vamos coletar dados de deslocamento do bloco apoiado sobre a superfície horizontal de forma que possamos determinar a aceleração do sistema utilizando as equações da cinemática. Através do valor dessa variável, poderemos determinar o coeficiente de atrito cinético através da Equação (11.32).

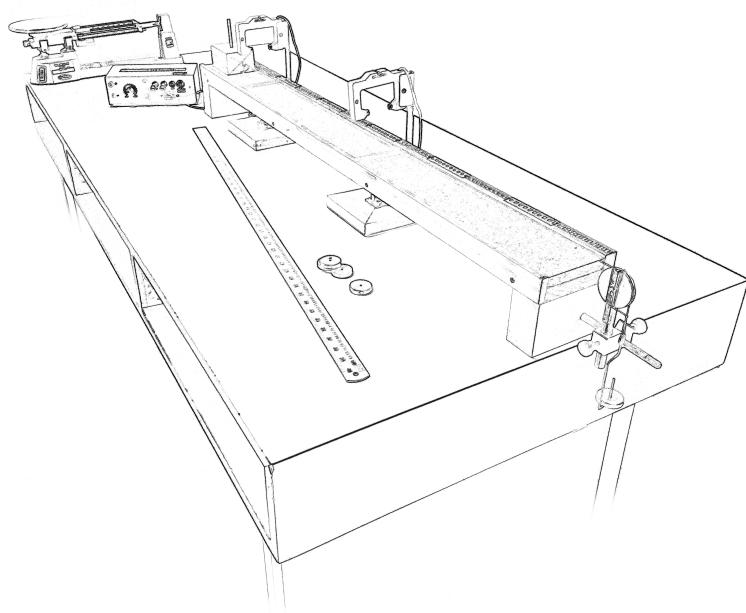


Figura 11.4: Aparato para a determinação do coeficiente de atrito cinético.

11.3.1 *Objetivos*

- Determinar o coeficiente de atrito estático entre diversos pares de superfícies;
- Verificar uma relação quadrática (parabólica) da posição do bloco sujeito à força de atrito cinético, caracterizando o movimento como um MRUV;
- Determinar o coeficiente de atrito cinético entre dois pares de superfícies.

11.4 *Material Necessário*

- Pranchas com superfícies uniformes de diversos tipos;
- Blocos com superfícies inferiores de diversos tipos;
- Aparato para atrito cinético (suporte, sensores óticos, cronômetro eletrônico, gancho, e roldana);
- Anilhas;
- Balança;
- Régua.

11.5 *Procedimento Experimental*

11.5.1 *Determinação do coeficiente de atrito estático*

1. Tome um dos blocos e uma da pranchas e disponha o bloco sobre a superfície. Anote o tipo da superfície inferior do bloco e o tipo da superfície superior da prancha na Tabela 11.1;

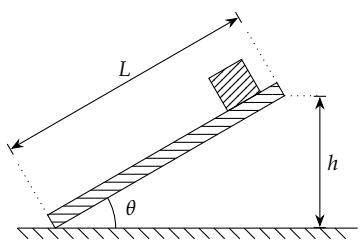


Figura 11.5: Parâmetros para a determinação do ângulo θ e do coeficiente de atrito estático μ_e .

2. Verifique o comprimento total L da prancha e o anote na Tabela 11.1;
3. Incline a prancha lentamente até que o bloco escorregue;
4. Meça a altura h da extremidade mais alta da prancha em relação à mesa e anote o valor na Tabela 11.1;
5. Repita o procedimento dos itens 3 e 4 mais duas vezes e anote os resultados na Tabela 11.1.
6. Tome outra prancha, com uma superfície diferente e repita os procedimentos dos itens acima, anotando os resultados na Tabela 11.1
7. Tome o outro bloco e proceda da mesma forma que para o primeiro, seguindo os itens acima. Anote os resultados na Tabela 11.1.

11.5.2 Determinação do coeficiente de atrito cinético

1. Tome um dos blocos e uma das pranchas. Anote o tipo da superfície inferior do bloco e o tipo da superfície superior da prancha na Tabela 11.2
2. Verifique a massa do bloco utilizando a balança, anotando-a na Tabela 11.2. Disponha-o sobre a prancha, de forma que sua extremidade esteja alinhada ao início da superfície;
3. Disponha o primeiro sensor¹ a aproximadamente 5,00 cm da extremidade do bloco oposta ao início da superfície;
4. Disponha o segundo sensor a aproximadamente 10,00 cm do primeiro sensor;
5. Ligue o bloco ao gancho através do fio, passando pela roldana;
6. Coloque no gancho o menor número de anilhas capaz de fazer com que o bloco deslize. Afira a massa do conjunto formado pelas anilhas e pelo gancho e anote os valores na Tabela 11.2;
7. Ligue/zere o cronômetro e volte a colocar o gancho na extremidade da corda, deixando-o suspenso. Alinhe o bloco novamente ao início da superfície e o segure, impedindo que o sistema se mova;
8. Solte o bloco e verifique o tempo cronometrado para a passagem entre os dois sensores. Anote o valor obtido na Tabela 11.2;
9. Reinicie o cronômetro e volte a determinar o tempo para a passagem do bloco entre os dois sensores mais duas vezes, tomando o cuidado de alinhar a extremidade do bloco ao início da superfície. Anote os valores de tempo obtidos na Tabela 11.2.
10. Desloque a posição do segundo sensor em 10,00 cm em relação ao valor inicial, afastando-o do primeiro sensor;
11. Repita os itens 7 a 10 anteriores e anote os valores na Tabela 11.2.

¹ Tome cuidado para que a posição de tal sensor não seja alterada durante todo o experimento.

12. Continue afastando o segundo sensor de 10,00 cm em 10,00 cm, coletando os dados de tempo para o deslocamento entre os sensores. A coleta de dados cessará quando a nova posição do segundo sensor for tal que não permita a passagem do bloco pelo sensor antes que o gancho com as anilhas atinja o chão.²

² Precisamos garantir que o movimento é acelerado em toda sua extensão. Se o gancho atingir o chão antes de o bloco passar pelo segundo sensor, teremos uma parte do movimento com velocidade constante.

Atrito

Turma: _____ Data: _____

Aluno(a): _____	Matrícula: _____

11.6 Questionário

Questão 1. (2 pontos) Preencha as colunas de dados das tabelas com o número adequado de algarismos significativos e unidades.

Questão 2. (2 pontos) Determine os valores médios do coeficiente de atrito estático para cada par de superfícies.

Questão 3. (2 pontos) Faça um gráfico $x \times \langle t \rangle$ para os dados obtidos para o movimento do bloco sujeito ao atrito cinético.

Questão 4. (4 pontos)

i. Faça uma regressão quadrática dos dados obtidos para o movimento do bloco sujeito ao atrito cinético.

ii. Compare a equação

$$x_f = x_i + v_i t + \frac{a}{2} t^2 \quad (11.34)$$

com a equação quadrática

$$y = A + Bx + Cx^2 \quad (11.35)$$

e determine o valor da aceleração do bloco e sua velocidade inicial, isto é, sua velocidade ao passar pelo primeiro sensor.

iii. Utilize o valor obtido para a aceleração para determinar através da Equação 11.32 o valor do coeficiente de atrito cinético.

11.7 Tabelas

Tabela 11.1: Dados para a determinação do atrito estático.

Blocos:

Superfície 1:

Superfície 2:

Pranchas:

Superfície 1:

Superfície 2:

Dados Experimentais (bloco 1 + superfície 1):

L	h	$\theta = \arcsen(h/L)$

Dados Experimentais (bloco 1 + superfície 2):

L	h	$\theta = \arcsen(h/L)$

Dados Experimentais (bloco 2 + superfície 1):

L	h	$\theta = \arcsen(h/L)$

Dados Experimentais (bloco 2 + superfície 2):

L	h	$\theta = \arcsen(h/L)$

Massas

m_{bloco}
$m_{\text{gancho e anilhas}}$

Superfícies

Bloco:
Prancha:

Dados Experimentais

x_0	x_f	t_1	t_2	t_3

Dados calculados

Δx	$\langle t \rangle$

Tabela 11.2: Dados para a determinação do atrito cinético.

12 Energia Mecânica

Realizaremos um experimento em que determinaremos através da energia mecânica a velocidade de um sistema em função da distância percorrida por uma massa suspensa. Verificaremos através dos dados obtidos a validade da previsão teórica obtida utilizando os conceitos de energia e trabalho. Utilizaremos os conceitos de medidas, algarismos significativos, gráficos, regressão linear, e linearização.

12.1 Conservação da energia mecânica

Se considerarmos um sistema de partículas, podemos afirmar que a variação da energia mecânica do sistema entre dois estados inicial e final quaisquer está ligada ao trabalho efetuado por forças não conservativas:

$$\Delta E_{\text{Mec}}^{\text{sis}} = W_{\text{NC}}, \quad (12.1)$$

onde a energia mecânica do sistema é dada pela soma das energias mecânicas das partículas que o compõe:

$$E_{\text{Mec}}^{\text{sis}} = \sum_i E_{\text{Mec},i}^i. \quad (12.2)$$

O trabalho das forças não conservativas deve ser considerado no deslocamento entre o estado inicial e o estado final, para cada força separadamente. Em um sistema, no entanto, é comum que as forças internas realizem trabalhos que se cancelam aos pares, o que garante que a energia do sistema se mantenha constante:

$$\Delta E_{\text{Mec}}^{\text{sis}} = 0, \quad (12.3)$$

ou, simplesmente,

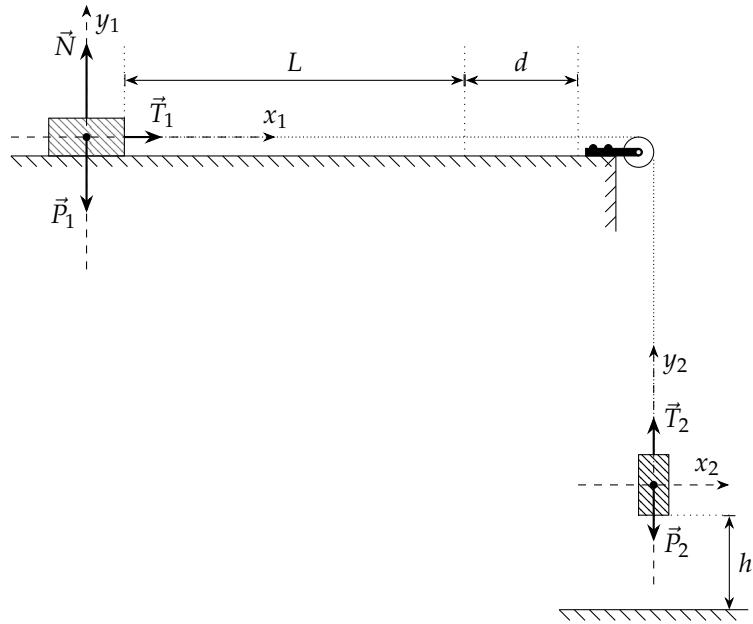
$$E_{\text{Mec},i}^{\text{sis}} = E_{\text{Mec},f}^{\text{sis}}. \quad (12.4)$$

Qualquer sistema real é formado por uma quantidade muito grande de partículas, o que pode tornar muito complexo identificar se o cancelamento dos trabalhos ocorre ou não, se considerarmos que as partículas possam se mover independentemente. Se, no entanto, considerarmos que os corpos são rígidos, garantimos que as partículas que interagem estão sujeitas a deslocamentos idênticos, porém sujeitas a forças cujos sentidos são opostos, o que garante que os trabalhos se cancelam. Resta, portanto, analisar as forças a que os corpos rígidos com um todo estão sujeitos.

12.1.1 Máquina de Atwood

Na Figura 12.1, temos um sistema formado por dois blocos ligados por uma corda que passa por uma polia. Se considerarmos que não

Figura 12.1: Sistema sujeito a um aumento na velocidade devido ao deslocamento vertical de uma massa suspensa.



há atrito entre o bloco da esquerda e a superfície sobre a qual se apoia, que não há atrito entre a polia e o eixo em torno do qual ela gira, e também desprezarmos a massa da polia e a força de arrasto oferecida pelo ar, podemos determinar a velocidade final dos blocos após um deslocamento h através da Equação (12.1):

$$\Delta E_{\text{Mec}}^{\text{sis}} = W_{\text{NC}} \quad (12.5)$$

$$E_{\text{Mec}}^f - E_{\text{Mec}}^i = W_{T_1} + W_{T_2}, \quad (12.6)$$

onde o estado inicial corresponde ao instante em que o sistema é liberado para se mover, e o estado final corresponde à iminência do choque do corpo suspenso com o solo.

Note que, se desprezarmos o atrito entre a polia e o eixo e a própria massa da polia temos que as tensões têm o mesmo módulo:

$$T_1 = T_2, \quad (12.7)$$

o que implica que os trabalhos dessas duas forças são iguais, porém têm sinais opostos:

$$W_{T_1} = -W_{T_2}. \quad (12.8)$$

Utilizando o resultado acima e o fato de que a única força conservativa a que o sistema está sujeito é força peso, temos

$$E_{\text{Mec}}^i = E_{\text{Mec}}^f \quad (12.9)$$

$$K_1^i + U_{g,1}^i + K_2^i + U_{g,2}^i = K_1^f + U_{g,1}^f + K_2^f + U_{g,2}^f. \quad (12.10)$$

Como os blocos partem do repouso e notando ainda que a posição vertical do bloco da esquerda não muda durante todo o movimento, ou seja,

$$U_{g,1}^i = U_{g,1}^f, \quad (12.11)$$

podemos reescrever a equação acima como

$$U_{g,2}^i = K_1^f + K_2^f + U_{g,2}^f. \quad (12.12)$$

Podemos agora substituir as expressões para as energias cinética e potencial gravitacional, notando ainda, se a corda é inextensível, que os dois corpos têm a mesma velocidade em módulo. Obtemos então

$$m_2gy_2^i = \frac{1}{2}(m_1 + m_2)v_f^2 + m_2gy_2^f, \quad (12.13)$$

e, finalmente,

$$v_f = \sqrt{\frac{2m_2gh}{m_1 + m_2}}. \quad (12.14)$$

Verificação experimental

Para que possamos verificar a validade da Expressão (12.14), devemos determinar a velocidade do sistema como função da altura h e das massas m_1 e m_2 . Podemos obter a velocidade do sistema através da cinemática ao considerar o tempo necessário para que o carrinho percorra uma distância d pré-determinada: se a altura h é menor que o comprimento L entre o carrinho e o início do intervalo de comprimento d , então o corpo suspenso se choca com o solo e o movimento do corpo sobre a mesa passa a ser com velocidade constante. Assim, basta calcularmos a velocidade através de

$$v = \frac{d}{\Delta t}. \quad (12.15)$$

Analisando a Expressão (12.14), verificamos que podemos fazer três gráficos diferentes (veja a Figura 12.2), cujas que expressam as dependências entre entre a velocidade e as variáveis h , m_1 , e m_2 , são dadas por

$$v_t^2 = Bh \quad (12.16)$$

$$v_t^2 = B/(A + m_1) \quad (12.17)$$

$$v_t^2 = Bm_2/(A + m_2) \quad (12.18)$$

$$= B/(1 + Am_2^{-1}). \quad (12.19)$$

Para que possamos validar a Expressão (12.14), precisamos que os dados experimentais correspondam de maneira aproximada às curvas da Figura 12.2. Regressões não-lineares não têm uma expressão fechada como no caso da regressão linear, porém são possíveis através de processos de aproximações sucessivas e podem ser realizadas usando softwares especializados.¹

¹ Não vamos abordar esse tipo de regressão pois ela foge um pouco ao escopo de uma introdução à análise de dados.

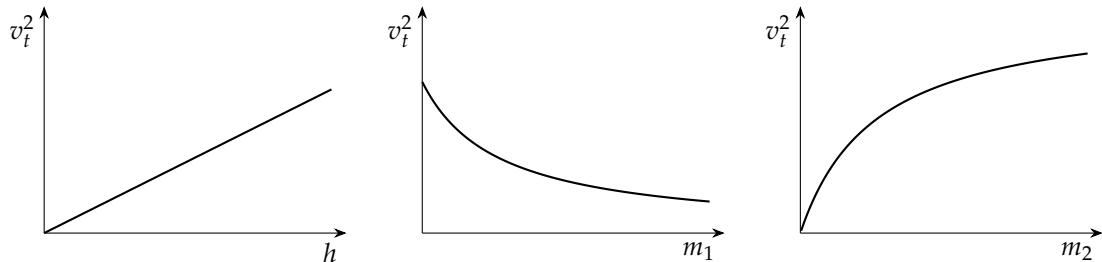


Figura 12.2: Curvas que expressam a dependência da velocidade ao quadrado com h , m_1 , e m_2 para o sistema retratado na Figura .

12.2 Experimento

Vamos analisar um sistema composto por um trilho de ar sobre o qual desliza um carrinho sujeito a uma aceleração devida à tensão em uma corda que sustenta um corpo suspenso e cuja representação esquemática é dada pela Figura 12.1. Nos valeremos do choque do corpo suspenso com o solo para que possamos cessar a aceleração do corpo sobre o trilho de ar, permitindo que possamos determinar a velocidade final do sistema através da cinemática, e que possamos compará-la ao valor obtido através da conservação da energia mecânica. Verificaremos a dependência da velocidade com a altura h percorrida pelo corpo suspenso, com massa m_1 do carrinho, e com a massa m_2 do corpo suspenso.

12.2.1 Objetivos

- Analisar o sistema do ponto de vista da conservação da energia mecânica;
- Construir gráficos $v_t^2 \times h$, $v_t^2 \times m_1$ e $v_t^2 \times m_2$ para os dados experimentais obtidos;
- Analisar os gráficos obtidos, visando observar a adequação dos dados à curvas esperadas.

12.3 Material Necessário

- Trilho de ar, carrinho, sensores, e cronômetro;
- Balança;
- Régua;
- Fio flexível e tesoura;
- Anilhas para o carrinho;
- Anilhas e gancho.

12.4 Procedimento Experimental

Ajuste do aparato

Os itens abaixo descrevem como ajustar o aparato para as tomadas de dados das seções seguintes.

1. Verifique a massa m_1 do carrinho, sem anilhas, e a anote na tabela pertinente;
2. Disponha o carrinho, sem anilhas, sobre o trilho de ar. O carrinho deve tocar o eletroímã, de forma que possa ser segurado por ele quando o fluxo de ar for ligado;

3. Ligue um segmento do fio flexível desde o carrinho, passando paralelamente ao trilho, passando sobre a polia e então verticalmente, até uma distância de aproximadamente 15,00 cm do solo;
4. Verifique a massa m_2 de um gancho e de uma anilha e anote o valor na tabela pertinente.
5. Ligue o gancho com as anilhas na extremidade suspensa do fio;
6. Meça a distância h até o solo da parte inferior do sistema formado pelo gancho e anilhas e anote na tabela pertinente;
7. Disponha os sensores próximos ao fim do trilho e anote a distância d entre eles na tabela pertinente. *Atenção: o primeiro sensor deve ser disposto de maneira a assegurar que o carrinho só passe por ele depois de o gancho com as anilhas ter atingido o chão, pois precisamos que sua velocidade seja constante no trajeto entre os sensores;*
8. Ligue o cronômetro, o eletroímã, e o fluxo de ar;

Variação da massa do carrinho m_1

1. Ajuste o aparato conforme descrito na Seção 12.4;
2. Desligue o eletroímã, liberando a movimentação do sistema. Registre o tempo medido pelo cronômetro na Tabela 12.1.
3. Religue o eletroímã, reposicione o carrinho e repita o item acima obtendo o valor do tempo mais duas vezes;
4. Tome uma anilha para o carrinho e verifique sua massa. Adicione-a ao carrinho e anote na Tabela 12.1 a nova massa *total* m_1 do carrinho.
5. Repita os itens acima para tantos valores de massa m_1 diferentes quanto possível.

Variação da massa suspensa

1. Ajuste o aparato conforme descrito na Seção 12.4;
2. Desligue o eletroímã, liberando a movimentação do sistema. Registre o tempo medido pelo cronômetro na Tabela 12.1.
3. Religue o eletroímã, reposicione o carrinho e repita o item acima obtendo o valor do tempo mais duas vezes;
4. Tome uma anilha para o gancho e verifique sua massa. Adicione-a ao gancho e anote na Tabela 12.1 a nova massa *total* m_2 do carrinho.
5. Repita os itens acima para tantos valores de massa m_2 diferentes quanto possível.

Variação da altura de queda

1. Ajuste o aparato conforme descrito na Seção 12.4;
2. Desligue o eletroímã, liberando a movimentação do sistema. Registre o tempo medido pelo cronômetro na Tabela 12.1.
3. Religue o eletroímã, reposicione o carrinho e repita o item acima obtendo o valor do tempo mais duas vezes;
4. Corte o fio na extremidade suspensa, diminuindo seu comprimento em aproximadamente 5,00 cm e religue o gancho ao fio. Verifique a nova distância entre o solo e a parte inferior do sistema formado pelo gancho e pelas anilhas;
5. Repita os itens acima para tantos valores de altura h diferentes quanto possível. *Atenção: devemos garantir que o gancho com as anilhas colida com o solo antes de o carrinho passar pelo primeiro sensor.*

Energia Mecânica

Turma: _____ Data: _____

Aluno(a): _____	Matrícula: _____

12.5 Questionário

Questão 1. (2 pontos) Preencha as colunas de dados das tabelas com o número adequado de algarismos significativos e unidades.

Questão 2. (3 pontos) Elabore os gráficos de $v_t^2 \times m_1$, $v_t^2 \times m_2$ e $v_t^2 \times h$ com os dados obtidos.

Questão 3. (2 pontos)

- i. Para o gráfico de $v_t^2 \times h$, faça uma regressão linear e determine o significado físico do coeficiente angular, isto é, determine o que tal coeficiente representa.
- ii. Determine o valor da aceleração da gravidade usando o coeficiente angular e calcule o erro percentual em relação ao valor de referência.

Questão 4. (3 pontos) Considerando os dados experimentais obtidos, é possível concluir que a Equação (12.14) é válida? Justifique sua resposta indicando quais dados suportam suas afirmações.

12.6 Tabelas

Parâmetros constantes

h	
m_2	
d	

Dados

m_1	Δt_1	Δt_2	Δt_3	$\langle \Delta t \rangle$

Tabela 12.1: Dados para o movimento variando a massa m_1 do carrinho.**Parâmetros constantes**

m_1	
h	
d	

Dados

m_2	Δt_1	Δt_2	Δt_3	$\langle \Delta t \rangle$

Tabela 12.2: Dados para o movimento variando a massa suspensa.

Parâmetros constantes

m_1	
m_2	
d	

Dados

h	Δt_1	Δt_2	Δt_3	$\langle \Delta t \rangle$

Tabela 12.3: Dados para o movimento variando a altura de queda da massa suspensa.

13 Elasticidade

Realizaremos um experimento visando mostrar o comportamento não-linear de um corpo que sofre uma deformação. Verificaremos através dos dados que a deformação segue uma forma característica conhecida como curva de histerese. Veremos que as deformações com dependência linear na força aplicada se restringem a condições muito específicas. Utilizaremos os seguintes conceitos/técnicas de análise de dados: medidas, algarismos significativos, gráficos, e erros de escala e propagados.

13.1 Elasticidade

Verificamos através da Lei de Hooke que a deformação de objetos em resposta a uma força aplicada é proporcional à intensidade da força:

$$\Delta x = \frac{F}{k}. \quad (13.1)$$

Sabemos, no entanto, que um objeto sujeito a uma força muito grande pode apresentar uma deformação permanente, ou mesmo se quebrar. Além disso, no caso mais geral, a deformação pode ser *não-linear*.

Mesmo para uma mola, caso clássico em que se aplica a Lei de Hooke, a deformação será não-linear se a distensão da mola for muito grande. Por isso se faz a restrição de que *a distensão da mola deve ser pequena*. Podemos entender melhor essa restrição chamando a força exercida pela mola de $f(x)$, onde x representa a distensão da mola, e fazendo uma expansão de $f(x)$ em uma série de Taylor. Esse tipo de expansão nos que diz que uma função $g(x)$ pode ser aproximada em torno de um ponto $x = a$ qualquer como

$$g(x) = \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{d^n g(x)}{dx^n} \Big|_{x=a} \right] \cdot (x-a)^n \quad (13.2)$$

$$= \frac{g(a)}{0!} + \frac{g'(a)}{1!}(x-a) + \frac{g''(a)}{2!}(x-a)^2 + \frac{g'''(a)}{3!}(x-a)^3 + \dots \quad (13.3)$$

$$= g(a) + g'(a)(x-a) + \frac{g''(a)}{2}(x-a)^2 + \frac{g'''(a)}{6}(x-a)^3 + \dots \quad (13.4)$$

onde $g'(a)$, $g''(a)$, $g'''(a)$, etc. são as derivadas da função $g(x)$ calculadas no ponto a .

Assim, podemos expandir a função $f(x)$ em torno de zero (considerando que esta é a posição de equilíbrio) como

$$f(x) = f(0) + f'(0)(x-0) + \frac{f''(0)}{2}(x-0)^2 + \dots \quad (13.5)$$

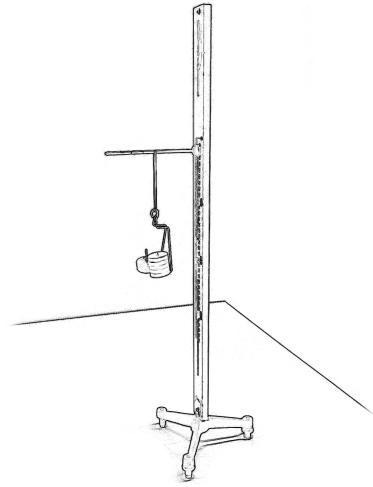


Figura 13.1: Ao submetermos um elástico a uma força variável, verificando a distensão registrada em função da força, obtemos uma *curva de histerese*.

No entanto, $f(0)$ é a força na posição de equilíbrio, ou seja, zero. Além disso, se x é muito pequeno, temos que x^2 é menor ainda e por isso podemos desprezar todos os termos de ordem 2 (termos quadráticos) ou maior. Obtemos então:

$$f(x) = f'(0)x, \quad (13.6)$$

e se fizermos $k \equiv f'(0)$,

$$f(x) = kx. \quad (13.7)$$

Portanto, quando falamos em pequenas distensões, *estamos restringindo os valores de termos de ordens quadrática ou superiores a valores muito menores que o termo de ordem linear*. Respeitada essa condição, o que poder ser feito através da escolha de uma distensão máxima adequada — isto é, que ela seja suficientemente pequena para que os termos de ordem superior a 2 sejam desprezíveis —, podemos tratar as deformações de um objeto como sendo lineares.

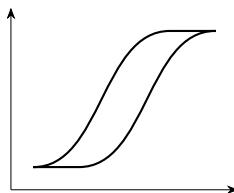


Figura 13.2: Gráfico típico de um fenômeno de histerese.

13.1.1 Elasticidade e Histerese

Uma característica que também pode ser observada no caso de uma deformação não-linear é a *histerese*. Temos na Figura 13.2 uma típica figura de histerese: quando efetuamos um aumento gradual da variável independente, ocorre um aumento não-linear da variável dependente. Quando passamos a fazer uma diminuição da variável independente, existe uma diminuição correspondente da variável dependente, porém os valores não coincidem com aqueles do processo de aumento. Vários sistemas físicos têm esse tipo de comportamento: deformações de materiais, magnetização de imãs, campos elétricos em alguns materiais, etc.

Na Figura 13.3 temos um gráfico da tensão em função deformação para um elástico de borracha. As linhas representam o processo de aumento e diminuição progressiva da tensão exercida sobre o elástico. Vemos que as duas curvas não coincidem. A explicação para este comportamento pode ser dada ao analisarmos o processo de um ponto de vista de energia: em uma mola, quando a esticamos, armazenamos energia potencial elástica. Já para um elástico de borracha, quando o esticamos, além de armazenarmos energia potencial elástica, também é possível notar um *aumento da temperatura do elástico*, o que ocasiona uma perda de calor para o ambiente. Ao relaxarmos a distensão, é necessária a absorção de calor do meio. Como esse processo é demorado, se relaxarmos o elástico rapidamente, percebemos que ele não volta ao tamanho original. Após algum tempo, no entanto, a absorção de calor ocorre e o restaura ao tamanho inicial.

Esse fenômeno pode ser entendido analisando a estrutura da borracha: ela é constituída de moléculas de polímeros de tamanhos diferentes, constituindo um emaranhado de fibras. Devido à agitação térmica das moléculas — agitação característica dos corpos a nível molecular associada à temperatura — as moléculas sofrem colisões laterais sucessivas, encurtando-se. Quando esticamos o elástico, as moléculas alinharam-se, colidindo lateralmente contra as menores,

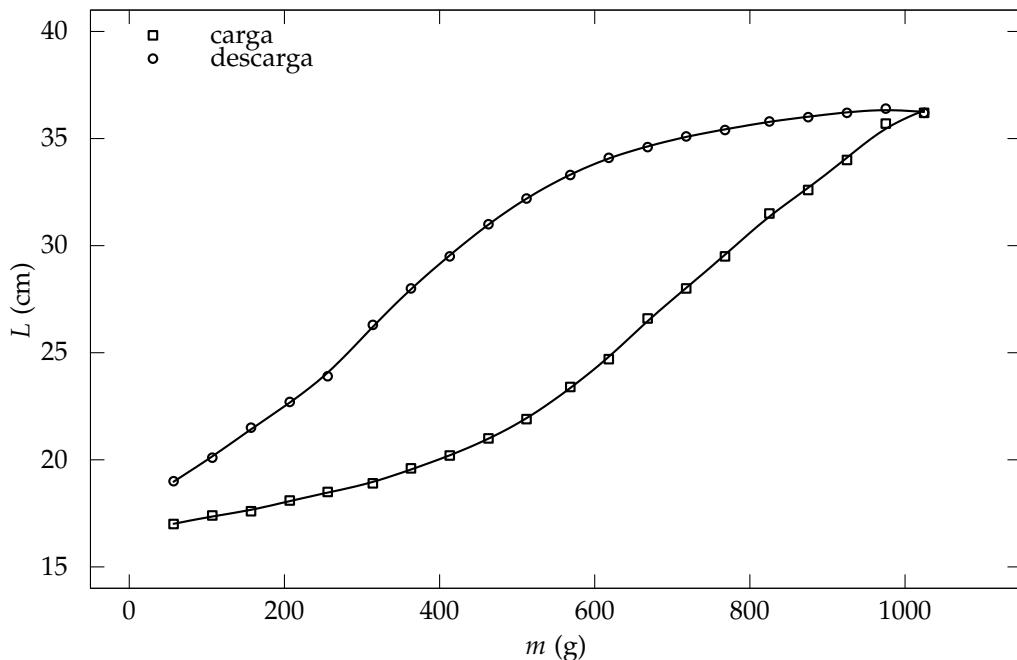


Figura 13.3: Gráfico de histerese para o processo de carregamento e descarregamento de um elástico. Note que o último ponto do processo de carga e o primeiro do processo de descarga coincidem. As linhas foram ajustadas utilizando uma spline de aproximação cúbica de Hermite.

transferindo energia cinética e aumentando a temperatura. Se o processo de esticamento demora tempo suficiente para que o calor seja transferido para o meio — através de colisões das moléculas mais próximas da superfície com as moléculas do ar, por exemplo, transferindo energia cinética para fora da borracha —, ao relaxarmos o elástico, não há energia suficiente nas moléculas menores para que elas colidam com as maiores e façam com que elas se contraiam totalmente. Portanto, há uma deformação residual no elástico.

13.2 Experimento

Realizaremos um experimento para verificar a curva de histerese do comprimento de um elástico de borracha: vamos pendurar o elástico em uma haste horizontal e na extremidade oposta vamos pendurar um gancho ao qual adicionaremos anilhas. Devido as propriedades da borracha, verificaremos um comportamento diverso ao de uma mola.

13.2.1 Objetivos

1. Realizar as medidas de deformação de um elástico verificando a curva de histerese resultante;
2. Verificar a dissipação de energia envolvida em processos que não são elásticos.

13.3 Material Necessário

- 20 anilhas metálicas e ganchos adequados para suportá-las;

- Suporte vertical com haste horizontal;
- Elástico de borracha;
- Réguas;
- Balança de braços.

13.4 Procedimento Experimental

1. Enumere as anilhas a lápis, pois posteriormente elas deverão ser retiradas na ordem inversa em que foram colocadas;
2. Verifique a massa m_a de cada uma das anilhas e anote na Tabela 13.1;
3. Verifique a massa m_g dos ganchos e anote na Tabela 13.1;
4. Na haste horizontal do suporte pendure um elástico de borracha e na sua extremidade livre pendure um gancho com uma anilha;
5. Meça o comprimento ℓ do elástico e o anote, juntamente com a massa total m_t sustentada pelo elástico, nas colunas correspondentes ao processo de “carga” da Tabela 13.1;
6. Adicione mais uma anilha e verifique o novo comprimento, anotando os dados para ℓ e m_t na Tabela 13.1;
7. Repita o item acima até que todas as anilhas tenham sido penduradas. Utilize ganchos adicionais quando necessário. Não esqueça de somar a massa do gancho;
8. Anote os últimos os valores¹ de comprimento e massa do processo de “carregamento” também nas colunas relativas ao processo de “descarregamento” Tabela 13.1;
9. Retire as anilhas suspensas pelo elástico uma a uma, realizando o processo inverso ao “carregamento”, anotando os valores de massa e comprimento correspondentes.

¹ Atenção: se houver demora para iniciar o processo de descarga, pode ser necessário realizar uma nova medida de comprimento, pois é comum que o elástico continue cedendo lentamente ao peso suspenso.

Elasticidade

Turma: _____ Data: _____

Aluno(a): _____	Matrícula: _____

13.5 Questionário

Questão 1. (1 ponto) Liste os instrumentos de medida utilizados. Descreva o tipo do equipamento, sua resolução, e seu erro de escala.

Questão 2. (2 pontos) Preencha as tabelas com o número adequado de algarismos significativos, unidades, e erros de escala apropriados.

Questão 3. (3 pontos) Elabore um gráfico de $\ell \times m$ — onde ℓ é o comprimento do elástico e m é a massa total correspondente ao conjunto de anilhas e ganchos que o elástico sustenta —. Ambos os conjuntos de dados (“carregamento” e “descarregamento” na Tabela 13.1) devem estar contidos no mesmo gráfico, sendo que os pontos de cada conjunto de dados devem estar claramente diferenciados.

Questão 4. (2 pontos)

- Calcule a diferença entre os comprimentos do elástico quando ele suporta somente uma anilha no processo de carga e no processo de descarga (a diferença entre a primeira medida realizada no carregamento e a última no descarregamento).
- Através de tal valor, calcule a diferença de energia potencial gravitacional entre as duas posições.²

Questão 5. (2 pontos) Considerando os objetivos do experimento, listados na Seção 13.2.1, e os resultados obtidos nas questões anteriores, discuta quais objetivos foram atingidos com sucesso, justificando suas conclusões. Se algum objetivo não foi atingido, discuta quais são os possíveis motivos do insucesso e que providências podem ser tomadas para que eles sejam alcançados.

² Essa diferença de energia pode ser considerada como a energia interna perdida pelo elástico durante o processo de carga e descarga realizado.

13.6 Tabelas

Nº	m_g		
		Carregamento	Descarregamento
Nº	m_a	ℓ	m_t
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			
11			
12			
13			
14			
15			
16			
17			
18			
19			
20			

Tabela 13.1: Dados obtidos para o comprimento do elástico e a massa correspondente.

14 Empuxo

Realizaremos um experimento para verificar a interação entre um sólido e um fluido quando o primeiro está total ou parcialmente submerso no segundo. Verificaremos experimentalmente o princípio de Arquimedes, calculando através dos dados obtidos a densidade do fluido. Veremos também o conceito de peso aparente e através dele calcularemos a densidade de alguns sólidos. Utilizaremos os seguintes conceitos/técnicas de análise de dados: medidas, algarismos significativos, gráficos, erros de escala e propagados, equação geral para o erro propagado, e regressão linear.

14.1 Empuxo

Se tomarmos um bloco de madeira e o colocarmos em uma bacia com água, verificaremos que ele flutua. Sabemos que existe uma força gravitacional que tende a fazer com que o bloco, se ele pudesse se mover livremente, acelere em direção ao centro da Terra. Concluímos então que a água deve exercer alguma força sobre ele, equilibrando o peso e mantendo o sistema com aceleração nula.

Podemos verificar a origem dessa força se tomarmos um bloco metálico, que afunda ao ser colocado na água e o prendendo a um dinamômetro conforme mostra a Figura 14.1. Se o becker estiver vazio, claramente a leitura do dinamômetro será igual à força peso do bloco quando o sistema estiver em equilíbrio. Se o enchermos, notaremos que o dinamômetro registrará uma nova medida de força, menor do que a primeira. O valor dessa nova medida é conhecido como *peso aparente* do corpo.

A origem dessa diferença pode ser entendida ao analisarmos as forças exercidas pela pressão do fluido nas superfícies superior e inferior do bloco (as laterais se cancelam, veja a Figura 14.3). A pressão exercida por um fluido não é constante, aumentando conforme a profundidade aumenta, e é definida como

$$P = \frac{F}{A}, \quad (14.1)$$

o que implica em

$$F = PA. \quad (14.2)$$

Logo, a força na parte inferior do bloco é maior que na parte superior, já que as áreas superior e inferior são idênticas.

Essa diferença entre as forças é o que denominamos como *força de empuxo*, representada aqui como \vec{F}_E (Figura 14.4). Sua direção e sentido são verticalmente para cima, pois equilibra — ao menos parcialmente — o peso. Podemos verificar a intensidade do empuxo imaginando a seguinte situação: substituímos o volume ocupado

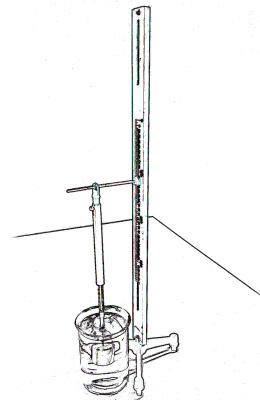


Figura 14.1: Bloco metálico suspenso por um dinamômetro e submerso em água.

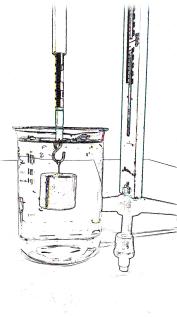


Figura 14.2: Detalhe da Figura 14.1.

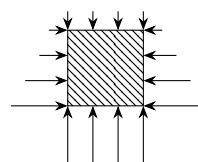


Figura 14.3: Forças atuando nas faces de um bloco submerso.

¹ Este resultado é conhecido como *princípio de Arquimedes*.

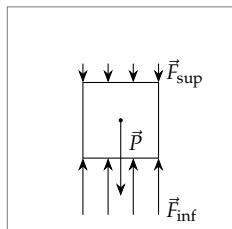


Figura 14.4: Diagrama de corpo livre representando as forças que atuam sobre o bloco quando submerso. No diagrama à direita, substituímos a soma $\vec{F}_{\text{inf}} + \vec{F}_{\text{sup}}$ das forças que atuam na parte inferior e superior do bloco por F_e , isto é, o empuxo. As forças laterais não estão representadas pois, por simetria, se equilibram.

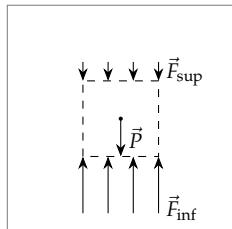


Figura 14.5: Diagrama de corpo livre representando as forças que atuam sobre uma massa de água que ocupa o volume original do bloco. As forças devido à pressão são iguais ao caso do bloco, porém o peso é menor. Como o meio é todo composto por água e deve então estar em equilíbrio, concluímos que o empuxo deve ser igual ao peso do volume de água deslocado (caso contrário não haveria equilíbrio).

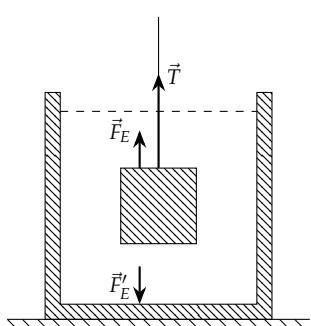


Figura 14.6: A reação à força de empuxo exercida sobre o corpo atua sobre o fundo do recipiente.

pelo bloco por água (veja a Figura 14.5). Nesse caso, sabemos que o “bloco de água” deve permanecer em equilíbrio, como qualquer outra região do líquido. Se o “bloco” está em equilíbrio, seu peso está sendo equilibrado pelo empuxo. Logo, o empuxo tem o mesmo módulo que o peso do líquido deslocado¹. No caso do bloco metálico acima, o empuxo é equivalente ao peso de um “bloco de água” com o mesmo volume que o bloco metálico.

14.2 Cálculo de densidades

14.2.1 Densidade de um sólido

Podemos calcular a razão da densidade de um objeto pela densidade da água usando um dinamômetro e uma proveta. Se pendurarmos o objeto no dinamômetro, verificaremos que — no equilíbrio — ele nos dará a leitura do módulo da força peso do objeto. Quando o mergulhamos, no entanto, teremos uma leitura menor, que denominamos anteriormente como peso aparente.

Temos então que

$$P = \rho V g \quad (14.3)$$

$$F_E = \rho_{\text{água}} V g \quad (14.4)$$

onde F_E é igual ao peso do volume de água deslocado, ρ é a densidade do material e $\rho_{\text{água}}$ é a densidade da água. Calculando a razão entre as equações acima, temos

$$\frac{P}{F_E} = \frac{\rho V g}{\rho_{\text{água}} V g} = \frac{\rho}{\rho_{\text{água}}}, \quad (14.5)$$

de onde podemos escrever, lembrando que o peso aparente é dado por

$$P_{\text{ap}} = P - F_E, \quad (14.6)$$

a seguinte relação para a razão $\rho / \rho_{\text{água}}$:

$$\frac{\rho}{\rho_{\text{água}}} = \frac{P}{P - P_{\text{ap}}}. \quad (14.7)$$

14.2.2 Densidade de um fluido

Podemos utilizar uma proveta, um fluido, uma balança, e um conjunto de corpos de prova para verificar a densidade do fluido.

Se tomarmos a proveta e a preenchermos com água até um certo nível, podemos pesá-la e encontraremos um valor para a massa do sistema. Ao pendurarmos o corpo de prova de forma que ele esteja submerso, porém sem tocar as laterais da proveta ou seu fundo, verificaremos um aumento na leitura da balança, porém esse aumento não corresponderá à massa do corpo. Ao verificarmos o diagrama de forças das Figuras 14.4 e 14.5, vemos que ao mergulharmos o corpo, há uma força de empuxo \vec{F}_e dirigida para cima e que equilibra parcialmente o peso do objeto. Onde está a reação a esta força de empuxo? A reação

a esta força deve agir sobre o líquido, que — por sua vez — exerce força sobre as paredes do recipiente (Figura 14.6). Como as forças exercidas sobre uma lateral qualquer se equilibram com as forças exercidas sobre a lateral oposta, resta a força exercida sobre o fundo do recipiente. Nessa situação, temos então que a balança registrará uma “massa aparente” adicional dada por²

$$m_{ap} = \frac{F_E}{g}. \quad (14.8)$$

Como o empuxo é o peso do volume de água deslocado, temos

$$m_{ap} = \frac{m_{água}g}{g} \quad (14.9)$$

$$= m_{água}. \quad (14.10)$$

Podemos então calcular a densidade da água através da razão entre a diferença das massas (depois e antes da submersão do corpo) e a diferença dos volumes indicados pela proveta:³

$$\rho_{água} = \frac{m' - m}{V' - V}. \quad (14.11)$$

Note que se tomarmos um gráfico dos valores de $m' \times V'$ para diversos corpos submersos, temos que a inclinação do gráfico será dada por

$$B = \frac{\Delta m}{\Delta V}. \quad (14.12)$$

Assim, se fizermos um gráfico desse tipo e traçarmos a melhor reta, podemos obter $\rho_{água}$ através do coeficiente angular.

² Mesmo em uma balança de braços, o que a balança registra é a força normal exercida para equilibrar o objeto, apesar de a escala estar marcada em unidades de massa.

³ As variáveis m' e V' denotam os valores registrados pela balança e pela proveta após a submersão do corpo.

14.3 Experimento

Para verificar as propriedades da força de empuxo, realizaremos dois experimentos. No primeiro, determinaremos a densidade relativa de alguns sólidos. Para isso, verificaremos o peso dos corpos de prova através de um dinamômetro e também seus pesos aparentes: o peso pode ser obtido pela leitura do dinamômetro quando este sustenta o corpo livremente, enquanto o peso aparente corresponde à leitura do dinamômetro quando este sustenta o corpo imerso em água.

Na segunda parte, determinaremos a densidade de um fluido através da leitura de massa obtida de uma balança. Sobre a balança é posto um becker com o fluido, dentro do fluido mergulhamos corpos de volumes diferentes, *porém sem deixar que eles toquem o fundo do becker*. Consequentemente, verificaremos que o valor da leitura de massa adicional registrado pela balança corresponde à força de empuxo, ou seja, ao peso do volume de líquido deslocado.

14.3.1 Objetivos

1. Verificar experimentalmente a existência da força de empuxo e a existência de um peso aparente para um objeto submerso.

2. Verificar experimentalmente a densidade de corpos de prova utilizando um dinamômetro e uma proveta.
3. Verificar experimentalmente a reação ao empuxo.
4. Verificar experimentalmente a densidade de um líquido utilizando uma balança e uma proveta.

14.4 Material Necessário

- Proveta;
- Balança;
- Dinamômetro;
- Becker com água;
- Corpos de prova diversos;
- Suporte vertical com haste horizontal.

14.5 Procedimento Experimental

14.5.1 Determinação da densidade relativa de sólidos

1. Disponha o dinamômetro na vertical com o auxílio do suporte com haste.
2. Zere o dinamômetro
3. Suspenda um corpo de prova usando o gancho do dinamômetro e efetue a leitura do peso real.
4. Mergulhe o corpo de prova de forma que ele não toque nas paredes e no fundo do becker. Verifique o valor do peso aparente.
5. Anote os dados obtidos para o peso na Tabela 14.1
6. Repita os itens 3 a 5 acima para os demais corpos de prova.

14.5.2 Determinação da densidade da água

1. Coloque 150,0 ml na proveta e meça a massa da proveta com a água;
2. Mergulhe o corpo de prova na proveta, cuidando para que ele não toque no fundo e nas bordas da proveta e determine a massa do conjunto;
3. Obtenha também a leitura para o volume indicado pela proveta.
4. Repita os itens 2 e 3 para os demais corpos.
5. Anote os resultados na Tabela 14.1

Empuxo

Turma: _____ Data: _____

Aluno(a): _____	Matrícula: _____

14.6 Questionário

Questão 1. (1 ponto) Liste os instrumentos de medida utilizados. Descreva o tipo do equipamento, sua resolução, e seu erro de escala.

Questão 2. (2 pontos) Preencha as tabelas com o número adequado de algarismos significativos, unidades, e erros de escala apropriados.

Questão 3. (2 pontos)

- Elabore um gráfico de $m' \times V'$ para os dados da Tabela 14.1.
- Calcule a reta que melhor representa os dados experimentais utilizando o método dos mínimos quadrados e a adicione ao gráfico.

Questão 4. (1,5 pontos) Calcule os valores para a densidade relativa ($\rho/\rho_{\text{água}}$) dos sólidos, juntamente com o erro propagado, através da Equação 14.7. Apresente os cálculos e preencha com os resultados obtidos a coluna correspondente da Tabela 14.1.

Questão 5. (1,5 pontos) Deduza a equação para o erro em uma divisão

$$(q \pm \delta q) = (x \pm \delta x) \div (y \pm \delta y) \quad (14.13)$$

a partir da Equação (3.65), obtendo a Equação (3.10d). Apresente os cálculos.

Questão 6. (2 pontos) Considerando os objetivos do experimento, listados na Seção 14.3.1, e os resultados obtidos nas questões anteriores, discuta quais objetivos foram atingidos com sucesso, justificando suas conclusões. Se algum objetivo não foi atingido, discuta quais são os possíveis motivos do insucesso e que providências podem ser tomadas para que eles sejam alcançados.

14.7 Tabelas

Tabela 14.1: Dados para as leituras de massa, volume, peso e peso aparente.

Dados de peso e peso aparente para os corpos de prova.

P	P_{ap}	$\rho/\rho_{água}$

Dados para a leitura de volume e massa.

V'	m'

15 Oscilações

Verificaremos o comportamento oscilatório de dois sistemas, um sistema massa-mola e um pêndulo simples. Veremos que através das Leis de Newton, chegamos a uma equação cuja solução é uma função periódica que descreve o movimento oscilatório observado. Utilizaremos os seguintes conceitos/técnicas de análise de dados: medidas, algarismos significativos, gráficos, erros de escala e propagados, equação geral para o erro propagado, regressão linear, e linearização.

15.1 Sistema massa-mola

Sabemos que a força exercida por uma mola é proporcional à sua distensão ℓ :

$$|F| = k\ell, \quad (15.1)$$

onde k é uma constante de proporcionalidade cujo valor varia de mola para mola. Adotando um sistema de referência cujo eixo x aponta verticalmente para cima, podemos escrever a expressão para a força como

$$F = -k\Delta x, \quad (15.2)$$

onde o sinal negativo significa que a força é no sentido contrário à distensão da mola. Note que x representa a posição do bloco, de forma que δx corresponde à distensão ℓ . Se adotarmos a origem do eixo x na posição inicial do bloco, temos que $x_i = 0$ e $x_f = x$, o que nos permite escrever a expressão para a força como

$$F = -kx. \quad (15.3)$$

Vamos considerar um sistema onde penduramos uma mola em um suporte, de forma que ela se disponha verticalmente, e prendemos um corpo de massa m à extremidade inferior. Deixamos o corpo descer até que a força exercida pela mola equilibre o peso. A partir dessa posição de equilíbrio, qualquer deslocamento exercido com que atue sobre o corpo uma força proporcional ao deslocamento, porém com sentido contrário a ele, tendendo a restaurá-lo à posição de equilíbrio. Utilizando a segunda lei de Newton, podemos descrever a dinâmica do corpo através de

$$F_R^x = ma_x \quad (15.4)$$

$$P^x + F_e^x = ma_x \quad (15.5)$$

$$-P + (-kx) = ma_x \quad (15.6)$$

$$-k \left(x + \frac{mg}{k} \right) = ma_x \quad (15.7)$$

$$-kx' = ma_x, \quad (15.8)$$

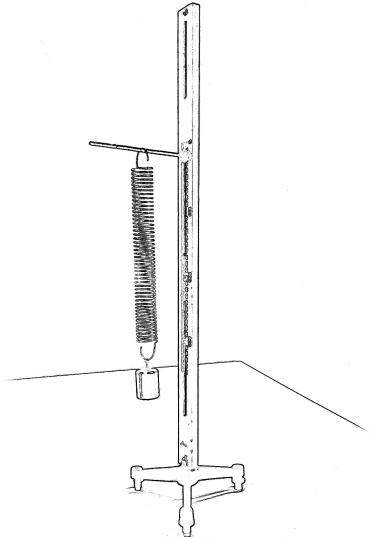


Figura 15.1: Sistema massa-mola.

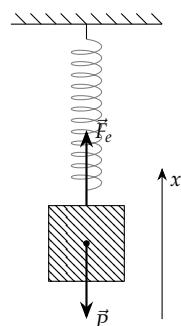


Figura 15.2: Direção e sentido das forças em um sistema massa-mola em equilíbrio.

onde o eixo x aponta verticalmente para cima e $x' \equiv x + mg/k$. A constante mg/k na expressão acima representa a distensão da mola após a adição da massa m em relação ao tamanho que ela tinha quando relaxada. Note também que

$$a_x = \frac{d^2}{dt^2} x \quad (15.9)$$

$$a'_x = \frac{d^2}{dt^2} x', \quad (15.10)$$

porém

$$a'_x = \frac{d^2}{dt^2} x' \quad (15.11)$$

$$= \frac{d^2}{dt^2} \left(x - \frac{mg}{k} \right) \quad (15.12)$$

$$= \frac{d^2}{dt^2} x + 0 \quad (15.13)$$

$$= a_x, \quad (15.14)$$

pois m , g , e k são constantes. Logo, podemos escrever

$$-kx' = ma'_x, \quad (15.15)$$

o que representa uma expressão para a aceleração em função da distensão da mola em relação à posição de equilíbrio do corpo.

Analizando essa equação, temos que sempre que o corpo se distancia da posição de equilíbrio, ele está sujeito a uma força na mesma direção, porém com o sentido oposto ao desse deslocamento, acelerando-o em direção à posição de equilíbrio (ou seja, em direção à posição de equilíbrio); isso é o que ocorre em todas as posições representadas na Figura 15.3, exceto t_0 , t_4 , e t_7 . Quando o objeto passa pela posição de equilíbrio — posições t_0 , t_4 , e t_7 —, sua aceleração é zero, porém sua velocidade não, o que o faz com que ele continue o movimento, dando origem a um *movimento oscilatório*.

Para descrever esse movimento, podemos substituir a aceleração na equação acima por sua definição em termos da derivada segunda da posição em relação ao tempo:

$$-kx' = m \frac{d^2 x'}{dt^2}, \quad (15.16)$$

ou, rearranjando os termos,

$$\frac{d^2 x'}{dt^2} + \frac{k}{m} x' = 0. \quad (15.17)$$

Através da equação acima, percebemos que a posição x' como função do tempo satisfaz uma condição curiosa: a posição vezes uma constante positiva somada à sua derivada segunda resulta em zero, ou seja, a função $x'(t)$ é tal que sua derivada é igual a ela mesma, vezes uma constante negativa. Existem duas funções que satisfazem essa condição: as funções trigonométricas seno e cosseno. Se supusermos que $x'(t)$ possui a forma

$$x'(t) = A \sin(\omega t + \phi), \quad (15.18)$$

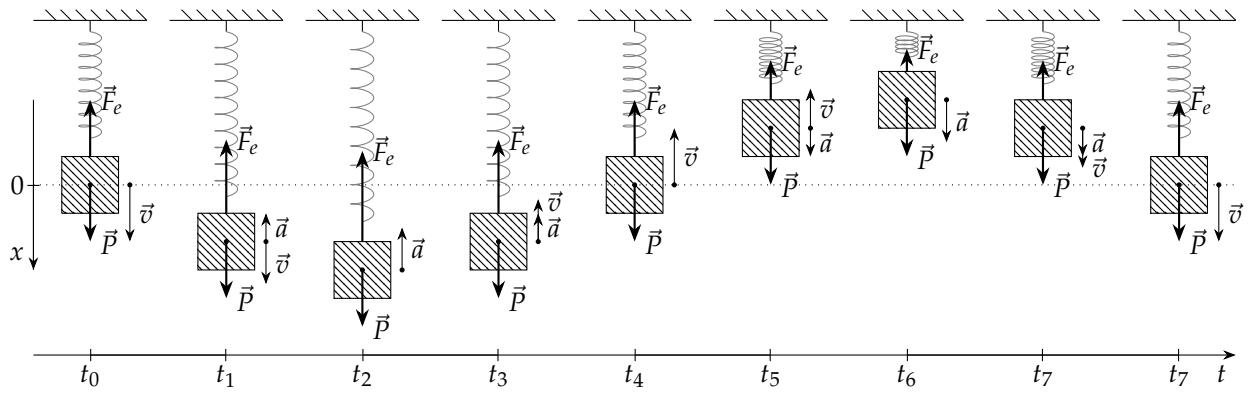


Figura 15.3: Evolução da posição do bloco em função do tempo.

verificamos que

$$\frac{d}{dt}x'(t) = v'(t) = A\omega \cos(\omega t + \phi) \quad (15.19)$$

$$\frac{d^2}{dt^2}x'(t) = a'(t) = -A\omega^2 \sin(\omega t + \phi). \quad (15.20)$$

Substituindo as expressões para a posição e para a aceleração na Equação (15.17), obtemos

$$-A\omega^2 \sin(\omega t + \phi) + \frac{k}{m}A \sin(\omega t + \phi) = 0 \quad (15.21)$$

o que pode ser simplificado a

$$\omega^2 = \frac{k}{m}. \quad (15.22)$$

Verificamos então que a forma suposta para $x'(t)$ é solução da Equação (15.17) se $\omega = \sqrt{k/m}$, sendo que as constantes A e ϕ podem assumir quaisquer valores. Claramente A representa os valores máximos de deslocamento do corpo em relação à posição de equilíbrio, e é denominada *amplitude* do movimento. Já a constante ϕ nos permite mudar o valor de $x(t = 0)$, e em geral escolhemos $\phi = 0$, o que implica em $x(0) = 0$. Portanto, concluímos que a posição do objeto descreve uma curva senoidal em um gráfico da posição em função do tempo. Além disso, a velocidade e a aceleração também dependem do tempo através de funções trigonométricas seno e cosseno.

Se analisarmos a função seno, vemos que ela tem um período igual a 2π , isto é, seu gráfico se repete a cada 2π radianos. Isso se reflete em um ciclo de oscilação do sistema massa mola, pois após o argumento do seno atingir 2π , o movimento se repete. Se considerarmos que o tempo para completar uma oscilação é o período T , temos, no instante que o objeto termina uma oscilação

$$\omega T = 2\pi \quad (15.23)$$

o que leva à seguinte equação para o período:

$$T = 2\pi \frac{1}{\omega}. \quad (15.24)$$

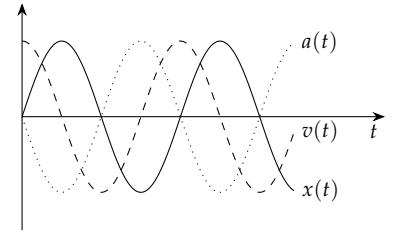


Figura 15.4: Gráfico da posição (linha contínua), velocidade (linha tracejada), e aceleração (linha pontilhada) como funções do tempo para um sistema massa-mola. (As escalas dos eixos verticais das três funções são diferentes para que os três gráficos possam ser comparados qualitativamente.)

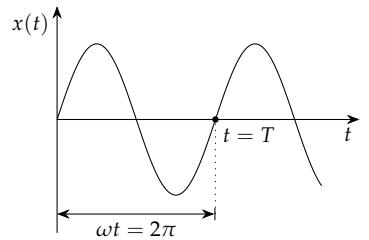


Figura 15.5: O tempo necessário para completarmos uma oscilação é o que denominamos como período T . Como a periodicidade da função seno é igual a 2π , quando $\omega t = 2\pi$, o movimento se repete e o valor de t é o do próprio período T .

Substituindo a expressão para ω , temos

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}. \quad (15.25)$$

Verificamos então que o período de oscilação do sistema massa-mola depende da massa do objeto e da constante k da mola.

Expressões como a Equação (15.17) são comuns em física e são denominadas *Equações Diferenciais Ordinárias*. As soluções para estas equações são *funções*. A Equação (15.17) em particular define o *Movimento Harmônico Simples*.

15.2 Pêndulo Simples

Podemos tratar um objeto que oscila preso a uma corda de massa desprezível como uma oscilação harmônica desde que o ângulo máximo de oscilação — isto é, a amplitude — seja pequena. Se essa condição for garantida, o pêndulo é denominado *pêndulo simples*.

Se deslocarmos um pêndulo para a direita, como na Figura 15.7, teremos uma componente da força peso que sempre tende a restaurar o pêndulo à posição de equilíbrio, o que dá origem a um movimento oscilatório. De acordo com a segunda lei de Newton para a rotação,

$$\tau = I\alpha. \quad (15.26)$$

O momento de inércia do pêndulo pode ser determinado através da expressão para o momento de inércia de um conjunto de partículas:

$$I = \sum_i m_i(r_{\perp}^i)^2, \quad (15.27)$$

onde r_{\perp}^i representa a distância da i -ésima partícula ao eixo de rotação: tal eixo é perpendicular ao círculo descrito pelo movimento do corpo preso à extremidade da corda e passa pelo ponto onde ela é fixada ao suporte. Como estamos tratando o caso em que a corda tem massa desprezível, podemos em boa aproximação considerar que toda a massa do pêndulo está localizada no centro de massa do corpo preso à corda. Assim,

$$I = mL^2, \quad (15.28)$$

sendo que consideramos que $r_{\perp} \approx L$.

Para determinar o torque τ , devemos calcular o produto vetorial $\vec{r} \times \vec{P}$, pois a força responsável pela aceleração angular é a própria força peso que atua no corpo preso à extremidade da corda. Além disso, não estamos interessados na direção do torque, uma vez que o movimento se restringe à rotação em torno do eixo de rotação; a direção de tal eixo não muda¹. Nesse caso podemos tomar o módulo de τ , obtendo

$$|\vec{\tau}| = |\vec{r} \times \vec{F}_R| \quad (15.29)$$

$$= |\vec{r} \times (\vec{T} + \vec{P})| \quad (15.30)$$

$$= |\vec{r} \times \vec{T} + \vec{r} \times \vec{P}|. \quad (15.31)$$

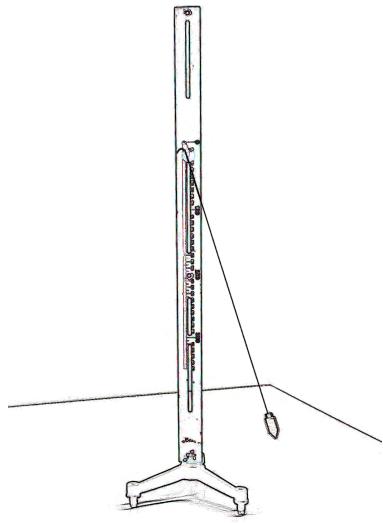


Figura 15.6: Pêndulo simples.

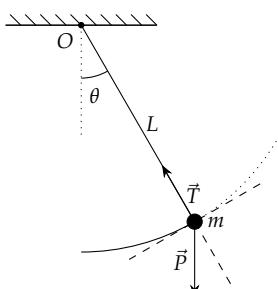


Figura 15.7: Diagrama de corpo livre do pêndulo simples.

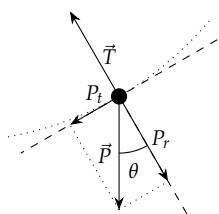


Figura 15.8: Decomposição da força peso em uma componente tangencial à trajetória circular e em uma componente ao longo da reta radial que liga o centro da trajetória à posição do corpo. O torque está relacionado à componente tangencial, dada por $P_t = mg \sin \theta$.

¹ É interessante notar que se o pêndulo for longo e a massa do corpo suspenso for grande, o pêndulo pode oscilar por muito tempo. Nesse caso verificaremos que o eixo de rotação muda de direção em relação ao solo. Esse efeito, porém, se deve à rotação da Terra e não da mudança do eixo de rotação do pêndulo.

Como o vetor \vec{r} parte da origem O e vai até a posição do corpo, ele aponta na mesma direção do fio e é colinear ao vetor tensão \vec{T} . Logo, o produto vetorial $\vec{r} \times \vec{T}$ é zero, e o torque é dado por

$$|\vec{\tau}| = |\vec{r} \times \vec{P}| \quad (15.32)$$

$$= mgL \sin \theta. \quad (15.33)$$

Substituindo os resultados para o momento de inércia e para o torque na segunda lei de Newton para a rotação, obtemos

$$-mgL \sin \theta = mL^2 \alpha. \quad (15.34)$$

O sinal está relacionado ao fato de que a força tem sempre direção contrária ao deslocamento. A aceleração α se refere à derivada segunda da posição angular do pêndulo, portanto podemos reescrever a expressão acima como

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} + \frac{g}{L} \sin \theta = 0. \quad (15.35)$$

Até este momento obtivemos uma equação que descreve o movimento de um pêndulo para qualquer valor de amplitude θ , devido à função seno, não temos uma oscilação harmônica. Uma propriedade do seno, no entanto, é que para valores pequenos do argumento θ — em radianos —, obtemos valores de $\sin \theta$ muito próximos dos próprios valores de θ . Isso pode ser visto através de uma expansão em série:

$$\sin \theta = \theta - \frac{\theta^3}{3!} + \frac{\theta^5}{5!} - \frac{\theta^7}{7!} + \dots, \quad (15.36)$$

onde θ é dado em radianos. Se θ é pequeno (muito menor que 1 rad), θ^3 é menor ainda, portanto os termos de ordem maior que θ são desprezíveis para pequenas oscilações. Logo,

$$\sin \theta \approx \theta, \quad (15.37)$$

o que nos leva a

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} + \frac{g}{L} \theta = 0. \quad (15.38)$$

Como a equação acima tem a mesma forma que a Equação 15.17, concluímos que o movimento para o pêndulo simples também é harmônico, sendo que $\theta(t)$ é dada por

$$\theta(t) = \theta_m \sin(\omega t + \phi), \quad (15.39)$$

onde θ_m representa a amplitude máxima de oscilação e ω é dado por

$$\omega = \sqrt{\frac{g}{L}}. \quad (15.40)$$

O período T , consequentemente, é dado por

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{L}{g}}. \quad (15.41)$$

15.3 Experimento

Vamos determinar o tempo necessário para completar 10 oscilações em dois osciladores harmônicos diferentes, um constituído por um sistema de anilhas em um gancho ligado a uma mola e o outro constituído por uma massa constante afixada a um fio de comprimento variável. Determinaremos então o período de uma oscilação dividindo o tempo total aferido pelo número de oscilações.

15.3.1 Objetivos

1. Verificar a relação entre o período e a massa para um sistema massa-mola.
2. Verificar a relação entre o período e o comprimento de um pêndulo simples.
3. Determinar a constante elástica de uma mola através do período de oscilação de um sistema massa-mola.
4. Determinar a aceleração da gravidade através do período de oscilação de um pêndulo simples.

15.4 Material Necessário

- Suporte vertical com haste horizontal;
- Mola;
- Ganchos e anilhas;
- Balança;
- Cronômetro;
- Fio flexível;
- Corpo pequeno ao qual se possa prender um fio;
- Régua milimetrada de 100,00 cm.
- Transferidor.

15.5 Procedimento Experimental

15.5.1 Sistema massa-mola

1. Prenda uma extremidade da mola à haste horizontal do suporte e a disponha verticalmente.
2. Afira a massa de um gancho com uma anilha, anotando o valor na Tabela 15.1. Prenda-os à extremidade inferior da mola.

3. Desloque o gancho e a anilha alguns centímetros para cima e solte. Deixe o sistema completar 10 oscilações, cronometrando o tempo necessário para efetuá-las. Utilize como erro para o cronômetro² o valor de 0,2 s.
4. Anote os resultados para o tempo necessário para completar as 10 oscilações na Tabela 15.1. Utilize unidades do SI.
5. Adicione anilhas ao gancho, uma a uma, e repita o processo acima para cada adição. Anote os valores de massa do gancho com as anilhas e o tempo correspondente de oscilação. Adicione tantas anilhas quanto possível, tomando o cuidado de não danificar a mola.

15.5.2 Pêndulo simples

1. Prenda o corpo pequeno à extremidade de um fio flexível.
2. Prenda prenda a outra extremidade do fio à haste horizontal do suporte, de forma que a distância entre a haste de sustentação e o centro de massa do corpo seja de aproximadamente 100,00 cm. Solte o corpo de forma que o fio fique esticado e o corpo se mantenha parado, sustentado pelo fio.
3. Desloque o corpo lateralmente, de forma que o ângulo entre o fio e a vertical não exceda 10,0°. Deixe o corpo completar 10 oscilações, cronometrando o tempo necessário. Anote o valor do comprimento do fio e do tempo para as 10 oscilações na Tabela 15.2. Utilize unidades do SI.
4. Diminua o tamanho do fio em 5,00 cm e calcule o novo tempo necessário para completar as 10 oscilações, anotando as informações na Tabela 15.2.
5. Repita o processo acima até um comprimento mínimo de 45,00 cm.

² Em um cronômetro manual o erro aleatório associado ao tempo de reação do operador é bastante significativo, sendo muito maior que o erro de escala. Por isso, podemos descartar o valor desse último e utilizar somente o próprio erro aleatório, que pode ser determinado a partir do desvio padrão. O valor de 0,2 s é um valor típico para o erro aleatório em um cronômetro manual.

Oscilações

Turma: _____ Data: _____

Aluno(a): _____	Matrícula: _____

15.6 Questionário

Questão 1. (1 ponto) Liste os instrumentos de medida utilizados. Descreva o tipo do equipamento, sua resolução, e seu erro de escala.

Questão 2. (2 pontos) Preencha as tabelas com o número adequado de algarismos significativos, unidades, e erros de escala apropriados.

Questão 3. (2 pontos)

- Elabore um gráfico³ de $T^2 \times m$ para os dados da Tabela 15.1.
- Calcule a reta que melhor representa os dados experimentais utilizando o método dos mínimos quadrados e a adicione ao gráfico.
- Demonstre a relação⁴ entre o coeficiente angular B e a constante da mola k , e calcule o valor desta última.

³ Utilize as unidades do SI ao elaborar o gráfico e efetuar a regressão linear para obter resultados de mais fácil interpretação.

⁴ Isto é, determine o significado físico de B

Questão 4. (2 pontos)

- Elabore um gráfico⁵ de $T^2 \times L$ para os dados da Tabela 15.2.
- Calcule a reta que melhor representa os dados experimentais utilizando o método dos mínimos quadrados e a adicione ao gráfico.
- Demonstre a relação entre o coeficiente angular B e a aceleração da gravidade g , e calcule o valor desta última.

⁵ Novamente, utilize as unidades do SI ao elaborar o gráfico e efetuar a regressão linear para obter resultados de mais fácil interpretação.

Questão 5. (1 ponto) Deduza a equação para o erro em uma potenciação

$$(q \pm \delta q) = (x \pm \delta x)^n \quad (15.42)$$

a partir da Equação (3.65), obtendo a Equação (3.10e). Apresente os cálculos.

Questão 6. (2 pontos) Considerando os objetivos do experimento, listados na Seção 15.3.1, e os resultados obtidos nas questões anteriores, discuta quais objetivos foram atingidos com sucesso, justificando suas conclusões. Se algum objetivo não foi atingido, discuta quais são os possíveis motivos do insucesso e que providências podem ser tomadas para que eles sejam alcançados.

15.7 Tabelas

m	T_{10}	T	T^2

Tabela 15.1: Dados para a oscilação de um sistema massa-mola.

L	T_{10}	T	T^2

Tabela 15.2: Dados para a oscilação de um pêndulo simples.

16 Ondas estacionárias

Submeteremos um fio a uma tensão e a uma vibração, com a consequente formação de ondas estacionárias. O objetivo desse experimento é verificarmos experimentalmente as propriedades de tais ondas e as relações com os diversos parâmetros do sistema. Utilizaremos os seguintes conceitos/técnicas de análise de dados: medidas, algarismos significativos, gráficos, software para elaboração de gráficos, erros de escala e propagados, equação geral para o erro propagado, regressão linear, linearização, e erros dos coeficientes A e B.

16.1 Ondas transversais

Uma onda mecânica é uma perturbação periódica que se propaga em um meio. No caso de uma onda transversal, tal perturbação é um deslocamento lateral, perpendicular à direção de propagação da onda. Esse tipo de onda pode ser descrita como uma função $y(x, t)$, onde y representa o valor da perturbação na posição x e tempo t . A forma mais simples para essa função é

$$y(x, t) = A \operatorname{sen}(kx - \omega t), \quad (16.1)$$

onde A é a amplitude da onda — isto é, o valor máximo atingido pela variável y — e os parâmetros k e ω são denominados como *número de onda* e *frequência angular*, respectivamente.

Tal expressão pode ser entendida de maneira simples se considerarmos dois casos especiais: $x = 0$ para qualquer t e $t = 0$ para qualquer x . Isso resulta nas expressões

$$y(t) = A \operatorname{sen}(\omega t), \quad (16.2)$$

e

$$y(x) = A \operatorname{sen}(kx). \quad (16.3)$$

O primeiro caso representa simplesmente a oscilação de um ponto do meio no qual a onda se propaga (especificamente, nesse caso, aquele localizado na origem do eixo x). No segundo caso, temos uma análise de toda a onda em um dado instante de tempo, como se a fotografássemos (veja a Figura 16.1).

Interpretação da frequência angular para uma onda

Sabemos que a função $\operatorname{sen} \theta$ se repete a partir de $\theta = 2\pi$, o que se reflete em uma repetição do movimento oscilatório. Consequentemente, temos que ao final de uma oscilação

$$\omega T = 2\pi, \quad (16.4)$$

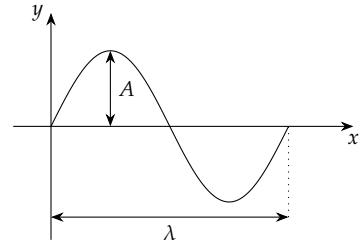


Figura 16.1: Parâmetros espaciais de uma onda transversal.

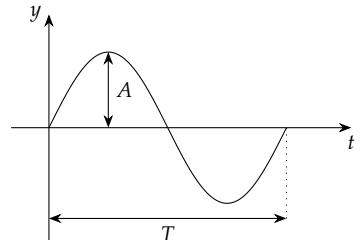


Figura 16.2: Parâmetros temporais de uma onda transversal.

onde usamos $t = T$ — isto é, a variável t assume o valor do *período* T da oscilação (o tempo que o movimento oscilatório demora para completar um ciclo) —. Logo

$$\omega = \frac{2\pi}{T}. \quad (16.5)$$

Para determinarmos o número de oscilações por unidade de tempo — ou seja, a *frequência* da oscilação —, basta calcularmos o inverso do período, ou seja,

$$f = \frac{1}{T}, \quad (16.6)$$

o que nos permite escrever

$$\omega = 2\pi f. \quad (16.7)$$

Interpretação do número de onda

Se nos deslocamos na direção do eixo x , observamos uma variação da posição y , sendo que após percorrermos uma distância λ — denominada *comprimento de onda* — o movimento se repete. Novamente, como a função $\sin \theta$ se repete após $\theta = 2\pi$, temos que para a posição $x = \lambda$

$$k\lambda = 2\pi, \quad (16.8)$$

ou

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}. \quad (16.9)$$

Velocidade de propagação de uma onda

Podemos calcular a velocidade de propagação da onda simplesmente verificando que uma crista qualquer (o ponto em que y atinge o valor máximo) se desloca uma distância λ a cada oscilação. Logo

$$v = \frac{\lambda}{T} = \lambda f = \frac{\omega}{k}. \quad (16.10)$$

A velocidade de propagação de uma onda é uma constante que depende de características do meio no qual ela se propaga. Em uma onda transversal em uma corda, por exemplo, ela é dada por

$$v = \sqrt{\frac{F_T}{\mu}}, \quad (16.11)$$

onde F_T representa a tensão a qual a corda está submetida, e μ representa a densidade linear de massa da corda. Portanto, os valores da frequência angular ω e do número de onda k não são independentes, pois estão ligados através da velocidade.

Sentido de propagação de uma onda

O sentido de propagação da onda está ligado ao sinal do termo ωt na Equação (16.1). Podemos entender tal relação se considerarmos um sistema de referência ortogonal xy e uma onda que se propaga

no sentido positivo do eixo x , como mostrado na Figura 16.3. No referencial xy , a onda é descrita através de uma função $y(x, t)$ e se propaga com velocidade v .

Em um segundo referencial ortogonal, denotado $x'y'$, que se move na direção e sentido do eixo x , com velocidade v em relação ao primeiro sistema de referência, temos que a velocidade da onda é nula. A função y' que descreve a onda deve então depender somente da posição x' nesse referencial, ou seja, temos somente $y'(x')$. Podemos assumir que no referencial $x'y'$ a expressão para a onda é dada por

$$y'(x') = A \operatorname{sen}(kx'). \quad (16.12)$$

A relação entre x' e x é dada por

$$x' = x - vt, \quad (16.13)$$

portanto, podemos escrever $y'(x, t)$ como

$$y'(x, t) = A \operatorname{sen}(k[x - vt]) \quad (16.14)$$

$$= A \operatorname{sen}(kx - kvt). \quad (16.15)$$

Considerando que a origem dos eixos y e y' coincide, podemos escrever $y'(x, t) = y(x, t)$, o que nos permite escrever

$$y(x, t) = A \operatorname{sen}(kx - \omega t), \quad (16.16)$$

onde utilizamos a Equação 16.10 para eliminar a velocidade. Note, portanto, que no caso em que a onda se desloca no sentido *positivo*, o sinal deve ser *negativo*.

Caso a onda se desloque no sentido negativo do eixo x , novamente com um sistema de referência ortogonal $x'y'$ que se move na mesma direção e sentido para a qual a onda se propaga — como mostrado na Figura 16.4 —, temos como única diferença o fato de que a relação entre x' e x é dada por

$$x' = x + vt, \quad (16.17)$$

de onde obtemos

$$y(x, t) = A \operatorname{sen}(kx + \omega t). \quad (16.18)$$

Portanto, se a onda se desloca no sentido *negativo* do eixo x , temos um sinal *positivo*.

Uma maneira alternativa de compreender a relação entre o sinal e o sentido de propagação é a de que se tomarmos um valor de x qualquer com um valor de $\operatorname{sen}(kx - \omega t)$ correspondente, quando t aumenta, o valor do argumento — isto é, $kx - \omega t$ — diminui. Equivalentemente, poderíamos simplesmente diminuir o argumento escolhendo um valor de x menor, ou seja, escolheríamos um ponto à esquerda. O efeito de aumentar o t é então o de tomar o “gráfico” do $\operatorname{sen}(kx)$ e deslocá-lo para a direita, o que implica em uma propagação da onda para a direita. Logo, para uma onda que se propaga no sentido positivo

$$y(x, t) = A \operatorname{sen}(kx - \omega t). \quad (16.19)$$

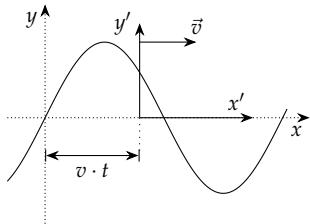


Figura 16.3: Para uma onda que se propaga no sentido positivo de x , a relação entre as coordenadas x e x' é $x' = x - vt$.

Onda transversal que se propaga no sentido positivo

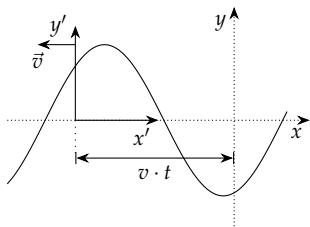


Figura 16.4: No caso de uma onda que se propagam no sentido negativo de x , a relação entre as coordenadas x e x' é $x' = x + vt$.

Onda transversal que se propaga no sentido negativo

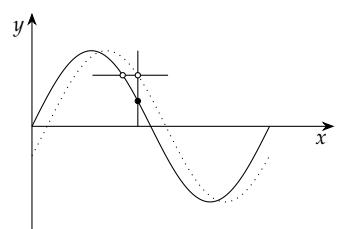


Figura 16.5: Ao aumentarmos o valor de t , temos uma diminuição do valor do argumento da função seno. Poderíamos ter uma diminuição equivalente reduzindo o valor de x , o que equivale a alterar a posição do ponto preenchido para o ponto vazio. Tal alteração equivale, por sua vez, a deslocar todo o gráfico para a direita.

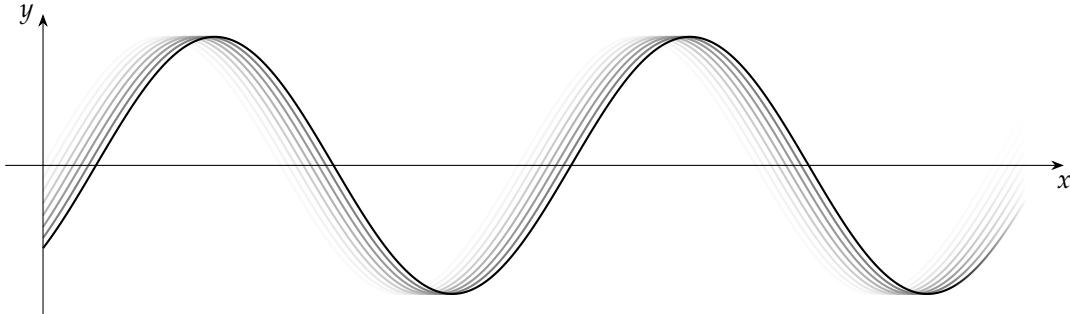


Figura 16.6: Evolução temporal de uma onda transversal descrita por $y(x, t) = A \sin(kx - \omega t)$.

¹ Uma maneira simples de se obter tal fenômeno é utilizar uma corda presa a uma parede e em cuja extremidade livre ligamos um oscilador (cuja função é gerar a perturbação, ou seja, a onda). Ao se propagar, a onda atinge a extremidade fixa e é refletida, passando a trafegar no sentido oposto, o que faz com que ela interfira com pulsos de onda gerados posteriormente, e que ainda estão se propagando no sentido original.

16.1.1 Ondas estacionárias

Vamos supor que duas ondas com os mesmos valores de amplitude A , frequência angular ω , e número de onda k , se propagam em sentidos opostos em um mesmo meio¹. Podemos descrever tais ondas através das expressões

$$y_1(x, t) = A \sin(kx - \omega t) \quad (16.20)$$

$$y_2(x, t) = A \sin(kx + \omega t). \quad (16.21)$$

Quando ambas estiverem se propagando em uma mesma região do meio de propagação, a onda resultante será dada por:²

$$y_{1+2}(x, t) = y_1(x, t) + y_2(x, t) \quad (16.22)$$

$$= A \sin(kx - \omega t) + A \sin(kx + \omega t). \quad (16.23)$$

Utilizando a propriedade

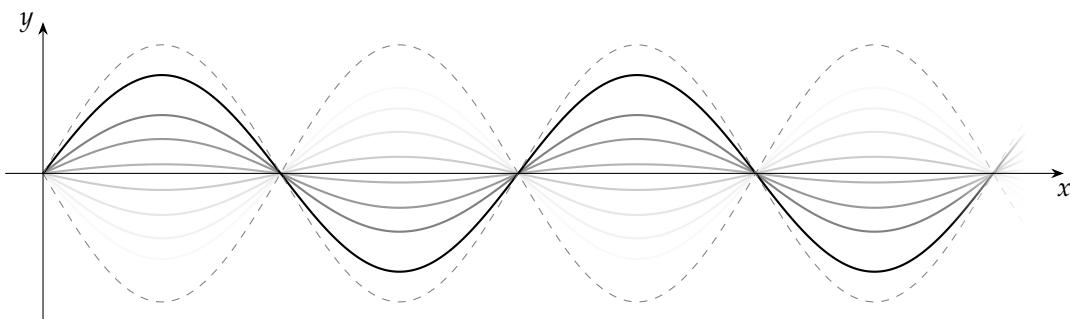
$$\sin \alpha + \sin \beta = 2 \sin[(\alpha + \beta)/2] \cos[(\alpha - \beta)/2], \quad (16.24)$$

podemos reescrever a superposição das duas ondas como

$$y_{1+2}(x, t) = [2A \sin kx] \cos \omega t. \quad (16.25)$$

Na Equação (16.25), o termo entre colchetes denota a amplitude de uma onda cuja posição no eixo y muda com o tempo conforme $\cos \omega t$. Analisando tal expressão, percebemos que para valores periódicos de x , o valor da amplitude é zero. Isso implica que, no caso da superposição das duas ondas, temos uma onda resultante na qual alguns pontos (denominados *nós*) permanecem parados, enquanto os demais pontos variam sua posição com o tempo, sendo que a amplitude dessa

Figura 16.7: Evolução temporal de uma onda transversal estacionária.



oscilação depende da posição em x . Podemos verificar na Figura 16.7 uma onda estacionária descrita por tal equação. A linha em preto mostra o estado atual, enquanto as demais mostram o estado da onda em instantes anteriores (em intervalos regulares de tempo). Note que existem “ventres” delimitados por $\pm 2A \sin kx$ (linhas tracejadas), isto é, ventres cujo perfil é dado pela função $2A \sin kx$ tanto acima, quanto abaixo da direção de propagação x . Portanto, o movimento da onda fica restrito a deslocamentos na direção do eixo y , limitado pelas linhas tracejadas.

De acordo com o termo $[2A \sin kx]$, a posição dos nós pode ser obtida fazendo com que

$$kx = n\pi. \quad (16.26)$$

onde $n = 0, 1, 2, 3, \dots$, isto é, um número inteiro não negativo. Substituindo a expressão para o número de onda $k = (2\pi)/\lambda$, obtemos

$$x = n \frac{\lambda}{2}. \quad (16.27)$$

Temos então que, para uma onda estacionária, os nós aparecem a cada meio comprimento de onda.

16.2 Ondas estacionárias em uma corda fixada em dois pontos

Em uma onda estacionária, os pontos de fixação devem ser obrigatoriamente nós (afinal, para que houvesse um ventre nos pontos de fixação, a corda precisaria oscilar, o que a fixação impede). Isso faz com que tenhamos um *número inteiro de meios comprimentos de onda* entre os pontos de fixação. Como a velocidade da onda no meio é uma constante característica do próprio meio, concluímos que somente algumas frequências específicas são capazes de gerar ondas estacionárias.

Sabemos que a amplitude da onda estacionária será nula sempre que

$$kx = n\pi, \quad (16.28)$$

logo, os dois primeiros nós são então em $x = 0$ (para $n = 0$) e em $x = \lambda/2$ (para $n = 1$). Isto significa que temos uma onda estacionária de forma que a distância entre os pontos de fixação equivale a *meio comprimento de onda*.

Temos outras possibilidades, no entanto: se assumirmos que no segundo ponto de fixação temos o terceiro nó, temos que a distância entre os pontos de fixação será coberta por dois ventres (um comprimento de onda). De forma geral temos que a distância L entre os pontos de fixação é igual a um número inteiro de meios comprimentos de onda:

$$L = n' \frac{\lambda}{2}. \quad (16.29)$$

O valor de $n' = 1, 2, 3, \dots$ designa o número³ de ventres da onda estacionária. Como a frequência está relacionada com a velocidade v e o comprimento de onda através de

$$f = \frac{v}{\lambda}, \quad (16.30)$$

³O número de ventres n' está relacionado ao número de nós n por $n' = n - 1$.

para uma onda estacionária temos que,

$$f = \frac{n'}{2L} \sqrt{\frac{T}{\mu'}} \quad (16.31)$$

⁴ No aparato experimental adotado, a corda passa por uma polia e sustenta um conjunto de anilhas. A tensão na corda será então igual ao peso do conjunto, isto é, $T = mg$.

onde utilizamos as Equações (16.11) e (16.29).⁴

Portanto, para uma corda cujas extremidades são fixas, existem múltiplos valores de frequência para os quais podemos ter uma onda estacionária. Essas frequências são denominadas *frequências de ressonância*, sendo que a menor delas é denominada *modo fundamental, frequência fundamental, ou primeiro harmônico*, e corresponde a um só ventre ($n' = 1$). As demais são denominadas *segundo harmônico* ($n' = 2$), *terceiro harmônico* ($n' = 3$), etc.

16.3 Experimento

Vamos submeter um fio disposto horizontalmente a uma oscilação forçada e que se propaga ao longo do fio como uma onda. Na extremidade oposta àquela que submetemos à oscilação, o fio passa por uma polia. Isso permite que a tensão no fio seja variada ao adicionarmos anilhas a um gancho afixado à extremidade do fio. Quando a onda que se propaga no fio chega à polia, ela sofre uma reflexão, passando a voltar e interferir com os pulsos de onda que se propagam no sentido original. Isso dará origem a ondas estacionárias, sendo que o número de nós de ventres formados está ligado à frequência de oscilação da onda, cujo valor podemos variar.

16.3.1 Objetivos

1. Verificar a proporcionalidade da frequência de ressonância f com a raiz quadrada da tensão exercida pela corda, sendo que a tensão será variada ao se alterar a massa m suspensa na extremidade livre;
2. Linearizar a equação que relaciona a frequência à massa, determinando a função $F_1(m)$ de forma que um gráfico $f \times F_1(m)$ seja linear.
3. Verificar a proporcionalidade da frequência de ressonância f com o inverso do comprimento L da corda.
4. Linearizar a equação que relaciona a frequência ao comprimento, determinando a função $F_2(L)$ de forma que um gráfico $f \times F_2(L)$ seja linear.
5. Determinar o valor da densidade linear de massa através do coeficiente angular dos gráficos $f \times F_2(L)$.

16.4 Material Necessário

- Gerador de ondas;

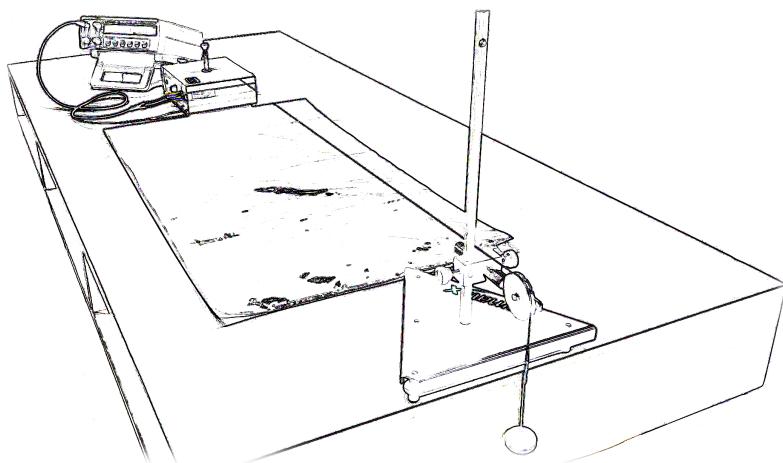


Figura 16.8: Aparato para a visualização de ondas estacionárias em uma corda.

- Trena;
- Fio fino;
- Balança;
- Anilhas leves e gancho;
- Polia com suporte.

16.5 Procedimento Experimental

16.5.1 Determinação da densidade linear de massa do fio (opcional)

O valor de densidade de massa do fio utilizado pode ser determinado com a utilização de uma balança de alta precisão⁵. Para isso basta tomarmos um segmento com um comprimento L arbitrário, porém determinado, e verificarmos qual a massa m correspondente. Obtemos a densidade linear de massa μ através da razão

$$\mu = \frac{m}{L}. \quad (16.32)$$

O valor obtido dessa forma será considerado o *valor de referência* na análise de dados.

⁵ Caso a determinação da densidade linear de massa μ não seja feita experimentalmente, utilize o valor de $\mu = (9,010 \pm 0,002) \times 10^{-4} \text{ g/cm}$.

16.5.2 Dependência da frequência de ressonância com a tensão aplicada

1. Ligue o gerador de ondas ao oscilador eletromecânico, dispondo o segundo a uma distância de aproximadamente 1,30 m da extremidade da mesa;
2. Prenda a polia ao suporte e a disponha de forma que fique para fora da mesa;
3. Tome um segmento de fio com tamanho adequado e o prenda ao pino do oscilador. Anote na Tabela 16.1 o valor de referência para densidade linear de massa μ do fio utilizado;

4. Afira a massa do gancho, juntamente com uma anilha e os pendure na extremidade livre da corda, fazendo-a passar pela polia e deixando o gancho suspenso. Anote na Tabela 16.1 o valor da massa m suspensa na corda;
5. Ligue o gerador de ondas e varie a frequência até que se forme uma onda estacionária com dois⁶ ventres ($n' = 2$);
6. Anote o valor da frequência f em que a onda estacionária se forma na Tabela 16.1. *Obs.: Em alguns equipamentos, a frequência pode variar constantemente. Nesse caso, anote os valores com uma casa após a vírgula e adote o valor de erro como sendo 0,1 Hz.*
7. Utilize a trena/régua para medir a distância L entre os nós das extremidades⁷. Anote o valor obtido na Tabela 16.1. Esse valor será aproximadamente constante e não precisa ser medido novamente.
8. Adicione mais uma anilha ao gancho e repita o processo a partir do item 4 até que a tabela seja completamente preenchida.

16.5.3 Dependência da frequência de ressonância com o comprimento do fio

1. Mantenha o aparato disposto conforme a descrição da seção anterior;
2. Utilizando uma ou duas anilhas, verifique o valor da massa m suspensa pelo fio (gancho e anilhas) e anote na Tabela 16.2. Desta vez manteremos a massa constante. Anote também o valor de referência da densidade linear de massa μ do fio;
3. Ligue o gerador de ondas e varie a frequência até que se forme uma onda estacionária com dois ventres ($n' = 2$). Anote o valor de frequência f na Tabela 16.2;
4. Utilize a trena para medir a distância L entre os nós das extremidades.⁸ Anote o valor de L na Tabela 16.2;
5. Mova o oscilador aproximadamente 10,0 cm em direção à polia e repita o processo a partir do item 3 até preencher a tabela ou até que as anilhas estejam prestes a tocar o chão.
6. Repita os itens acima para ondas estacionárias com *três ventres* ($n' = 3$), preenchendo a Tabela 16.3.

⁶ Esse harmônico foi escolhido por ser o de mais fácil visualização.

⁷ A distância deve ser medida entre o ponto em que a corda toca a polia (onde se localiza um dos nós) e o nó que deve se formar um pouco antes do pino do oscilador. Em muitos casos o nó se forma tão próximo do pino que não podemos distingui-lo. Nesse caso meça a distância entre a polia e o próprio pino do oscilador. Este valor é, efetivamente, o comprimento da corda.

⁸ Novamente, devemos medir a distância entre o nó determinado pelo ponto em que a corda toca a polia e o nó que se forma próximo ao pino do oscilador.

Ondas Estacionárias

Turma: _____ Data: _____

Aluno(a): _____	Matrícula: _____

16.6 Questionário

Questão 1. (1 ponto) Liste os instrumentos de medida utilizados. Descreva o tipo do equipamento, sua resolução, e seu erro de escala.

Questão 2. (2 pontos) Preencha as tabelas com o número adequado de algarismos significativos, unidades, e erros de escala apropriados.

Questão 3. (1,5 pontos)

- i. Elabore um gráfico **linear** de f em função da massa m para os dados da Tabela 16.1. Será necessário efetuar uma mudança de variáveis.
- ii. Calcule a reta que melhor representa os dados experimentais utilizando o método dos mínimos quadrados e a adicione ao gráfico.
- iii. Considerando a linearização adotada e a Equação (16.31), identifique os coeficientes angular B e linear A .
- iv. Utilizando a relação obtida para o coeficiente angular, determine a densidade linear de massa do fio a partir do valor obtido para B na questão anterior.
- v. Determine o erro percentual da densidade linear de massa do fio em relação ao valor de referência utilizando a expressão

$$E\% = \left| \frac{x - x_{\text{ref}}}{x_{\text{ref}}} \right| \times 100. \quad (16.33)$$

Questão 4. (2 pontos)

- i. Calcule o erro associado ao coeficiente angular obtido na Questão 3.
- ii. A partir dos valores do coeficiente e do erro, determine o erro associado à densidade linear de massa do fio. Apresente seus cálculos.

Questão 5. (1,5 pontos)

⁹ Os dois conjuntos de dados devem estar contidos no mesmo gráfico.

- i. Elabore um gráfico⁹ **linear** de f em função de L para os dados das Tabelas 16.2 e 16.3. Novamente, será necessário efetuar uma mudança de variáveis.
- ii. Calcule as retas que melhor representam os dados experimentais utilizando o método dos mínimos quadrados e as adicione ao gráfico.

Questão 6. (2 pontos) Considerando os objetivos do experimento, listados na Seção 16.3.1, e os resultados obtidos nas questões anteriores, discuta quais objetivos foram atingidos com sucesso, justificando suas conclusões. Se algum objetivo não foi atingido, discuta quais são os possíveis motivos do insucesso e que providências podem ser tomadas para que eles sejam alcançados.

16.7 Tabelas

Parâmetros constantes

L	
μ	

Dados para a massa e a frequência correspondente

m	f

Parâmetros constantes

m	
μ	

Dados para o comprimento e a frequência correspondente

L	f

Tabela 16.1: Dados para a frequência de surgimento do **segundo harmônico** ($n' = 2$).

Tabela 16.2: Dados para a frequência de surgimento do **segundo harmônico** ($n' = 2$).

Tabela 16.3: Dados para a frequência de surgimento do **terceiro harmônico** ($n' = 3$).

17 Dilatação linear e lei de resfriamento de Newton

Realizaremos um experimento de dilatação linear de sólidos verificando a relação entre o comprimento de tubos metálicos e sua temperatura. Verificaremos também qual é a evolução temporal da temperatura dos tubos no processo de resfriamento. A partir dos resultados obtidos, calcularemos os coeficientes de dilatação dos materiais dos tubos e os identificaremos. Verificaremos também qual é a expressão que descreve a evolução da temperatura durante o processo de resfriamento. Veremos a expressão para a dilatação linear e também o conceito de equação diferencial. Utilizaremos os seguintes conceitos/técnicas de análise de dados: medidas, algarismos significativos, gráficos, software para elaboração de gráficos, erros de escala e propagados, equação geral para o erro propagado, regressão linear, linearização, e erros dos coeficientes A e B .

17.1 Dilatação Linear

Ao resfriarmos ou aquecermos um objeto, verificamos que ele tem suas dimensões alteradas. Isso é especialmente notável em fios longos, pois a variação do comprimento é proporcional ao comprimento do objeto. Esse fenômeno têm muitas implicações práticas: pontes necessitam de juntas de dilatação, assim como pisos e trilhos de trem. Caso não as tivessem, com um aumento ou diminuição de temperatura, apareceriam deformações e rachaduras que deteriorariam essas estruturas.

Muitas vezes esse tipo de comportamento pode ser usado de maneira positiva: duas peças metálicas podem ser unidas sem soldas se elas forem feitas de forma que uma das peças encaixe em um orifício da outra somente se a segunda for aquecida — estando, portanto, dilatada —. Quando a peça externa for resfriada, ela se contrairá e acabará prendendo a peça interna.

Além de notarmos que a dilatação é proporcional às dimensões do objeto, verifica-se experimentalmente que quanto maior a variação de temperatura a que o objeto é submetido, maior é a variação do comprimento. Observamos ainda que materiais diferentes tem variações diferentes de comprimento para uma mesma variação de temperatura. Essas observações podem ser condensadas na seguinte equação:

$$\Delta L = L_0 \alpha \Delta T, \quad (17.1)$$

onde α é uma constante característica do material, L_0 é o comprimento inicial do objeto — ou seja, seu comprimento antes de sofrer a variação de temperatura — e $\Delta T = T - T_0$ (T_0 é a temperatura inicial e T é a temperatura final do corpo).

Material	α ($1/^\circ\text{C}$)
Alumínio	$23,1 \cdot 10^{-6}$
Bronze/Latão	$19 \cdot 10^{-6}$
Cobre	$16,5 \cdot 10^{-6}$
Chumbo	$28,9 \cdot 10^{-6}$
Ferro	$11,8 \cdot 10^{-6}$
Aço	$11 \cdot 10^{-6}$

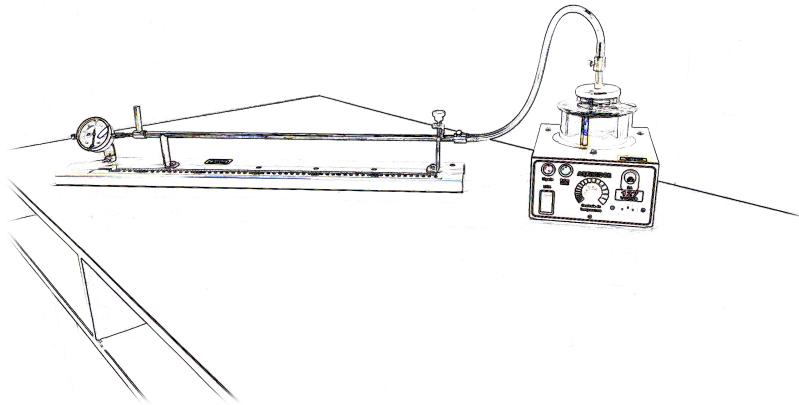
Tabela 17.1: Valores dos coeficientes de expansão térmica para alguns metais.

Se compararmos a expressão acima com a equação da reta $y = A + Bx$, podemos fazer a seguinte identificação entre as variáveis:

$$\begin{aligned} y &= \Delta L & x &= (T - T_0) \\ A &= 0 & B &= \alpha L_0 \end{aligned}$$

Segundo as relações acima, se realizarmos um experimento no qual variarmos a temperatura de — por exemplo — uma barra metálica, anotando os valores do variação do comprimento em função da variação de temperatura, verificaremos ao fazer a regressão linear que o coeficiente angular B será igual ao produto do coeficiente de expansão térmica α pelo comprimento inicial da barra.

Figura 17.1: Equipamento para a verificação experimental da dilatação linear de sólidos.



17.2 Lei de resfriamento de Newton

De acordo com a lei do resfriamento de Newton¹

A taxa de variação da temperatura de um corpo é proporcional à diferença entre sua temperatura e a temperatura do ambiente.

Em termos matemáticos podemos descrever a afirmação acima como

$$\frac{dT}{dt} \propto -(T - T_a), \quad (17.2)$$

onde T representa a temperatura do corpo, dT/dt representa a taxa de variação temporal de tal temperatura e T_a representa a temperatura ambiente. O sinal negativo denota o fato de que se $T > T_a$, o corpo sofre uma *diminuição* de sua temperatura, o que significa que $dT/dt < 0$. Podemos escrever a equação acima como uma igualdade com o auxílio de uma constante:

$$\frac{dT}{dt} = -k(T - T_a). \quad (17.3)$$

Verificamos que a temperatura T deve ser então uma *função do tempo*, ou seja $T = T(t)$. Podemos encontrar tal função se definirmos

$$y(t) = T(t) - T_a, \quad (17.4)$$

de onde temos que

$$\frac{dy(t)}{dt} = \frac{dT(t)}{dt} - \frac{dT_a}{dt}. \quad (17.5)$$

O segundo termo à direita é zero, pois a temperatura ambiente é constante, portanto

$$\frac{dy(t)}{dt} = \frac{dT(t)}{dt}. \quad (17.6)$$

Substituindo esse resultado e a própria definição de $y(t)$ na Equação 17.3, obtemos

$$\frac{dy(t)}{dt} = -ky(t), \quad (17.7)$$

o que pode ser reescrito como

$$\frac{dy(t)}{y(t)} = -kdt. \quad (17.8)$$

Se imaginarmos que $y(t)$ tem um valor inicial $y(t_i)$ no instante t_i e um valor final $y(t_f)$ em um instante t_f , podemos integrar o lado esquerdo entre os valores inicial e final de $y(t)$ e o lado direito entre os valores inicial e final do tempo, obtendo

$$\int_{y(t_i)}^{y(t_f)} \frac{dy(t)}{y(t)} = -k \int_{t_i}^{t_f} dt, \quad (17.9)$$

o que resulta em

$$\ln \frac{y(t_f)}{y(t_i)} = -k(t_f - t_i), \quad (17.10)$$

onde usamos $\ln \alpha - \ln \beta = \ln(\alpha / \beta)$. Essa equação fica mais simples se fizermos $t_i = 0$, $t_f = t$ e tomarmos a exponencial de ambos os lados da equação:

$$y(t) = y(0)e^{-kt}. \quad (17.11)$$

Finalmente, se notarmos que $y(0) = T(0) - T_a$ e que $T(0)$ é a temperatura inicial T_0 do corpo, encontramos

$$T(t) = T_a + (T_0 - T_a)e^{-kt}. \quad (17.12)$$

Temos então que a temperatura do corpo decai segundo uma lei exponencial, com uma constante característica k .

17.2.1 Linearização

Voltando à Equação 17.10, podemos reescrevê-la como

$$\ln y(t) = -kt + \ln y(0) \quad (17.13)$$

onde utilizamos $t_i = 0$. Utilizando a definição de $y(t)$, temos

$$\ln(T(t) - T_a) = -kt + \ln(T_0 - T_a). \quad (17.14)$$

Comparando essa equação com a equação da reta, temos

$$y = \ln(T(t) - T_a) \quad (17.15a)$$

$$x = t \quad (17.15b)$$

$$B = -k \quad (17.15c)$$

$$A = \ln(T_0 - T_a). \quad (17.15d)$$

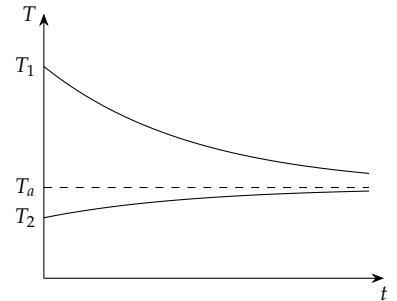


Figura 17.2: Gráfico da temperatura em função do tempo para o resfriamento e para o aquecimento de um corpo segundo a Lei de Newton para o Resfriamento. As temperaturas iniciais são tais que $T_1 > T_a > T_2$, sendo que para $t \rightarrow \infty$ as temperaturas T_1 e T_2 tendem à temperatura ambiente.

Portanto, podemos determinar o valor de k a partir de uma regressão linear.

17.3 Experimento

Vamos aquecer tubos metálicos em forma de L através de um fluxo de vapor d'água. Como o tubo estará preso próximo da extremidade de sua lateral maior, verificaremos uma leitura no dilatômetro disposto em contato com a extremidade livre. Após isso, cessaremos o fluxo de vapor, permitindo que o tubo inicie um processo de resfriamento. Durante o resfriamento, monitoraremos a leitura do dilatômetro, que registrará o encolhimento do tubo, bem como de sua temperatura.

17.3.1 Objetivos

1. Verificar a lineariedade da relação entre o comprimento de barras metálicas de diferentes materiais e a variação da temperatura.
2. Calcular o coeficiente de expansão térmica para o material das barras identificando o material da barra com base em tal propriedade.
3. Verificar o decaimento exponencial da temperatura, de acordo com a lei do resfriamento de Newton.
4. Determinar o valor de k para cada uma das barras.

17.4 Material Necessário

- Tubos metálicos em forma de L;
- Aquecedor elétrico de água;
- Termômetro;
- Régua;
- Aparato para medição de dilatações térmicas lineares;
- Cronômetro.

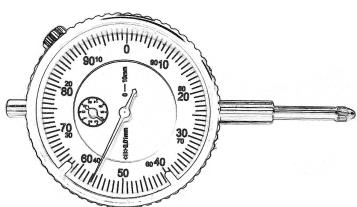


Figura 17.3: Dilatômetro. Note a existência de números pequenos para facilitar a leitura nos casos em que ocorre uma diminuição de tamanho. A coroa externa pode ser girada para zerar o dilatômetro, bastando para isso soltar o parafuso superior.

17.5 Procedimento Experimental

1. Escolha um dos tubos metálicos e o coloque com a extremidade em forma de L em contato com o dilatômetro, com o segmento menor disposto verticalmente para cima.
2. Posicione a extremidade do tubo de forma que ela pressione o pino do dilatômetro e fique a uma distância de aproximadamente 520,0 mm do parafuso de fixação (utilize a escala milimetrada do suporte). Prenda a outra extremidade do tubo utilizando o parafuso do suporte.
3. Prenda a mangueira do aquecedor à extremidade horizontal do tubo (aquele oposta ao dilatômetro).

4. Adicione água ao aquecedor até uma profundidade de aproximadamente 5,0 cm. *Importante: o aquecedor não pode ficar sem água durante o experimento, pois isso pode causar um superaquecimento e a consequente queima do aparelho.*
5. Ligue o aquecedor e aguarde até que a água ferva.
6. Quando a água ferver, o tubo dilatará. Quando ele parar de dilatar, coloque o termômetro na extremidade do tubo mais próxima do dilatômetro e aguarde até que sua temperatura pare de variar.
7. Utilizando a régua ou a escala do suporte, meça o comprimento L_0 da barra entre o parafuso de fixação e a extremidade próxima ao dilatômetro. Anote este valor na Tabela 17.2.
8. Anote também a temperatura T_0 indicada pelo termômetro.
9. Zere o dilatômetro girando a coroa exterior.
10. Zere o cronômetro.
11. Desligue o aquecedor e aguarde até que o ponteiro do dilatômetro passe a se mover². Assim que ele o fizer, inicie o cronômetro.
12. Quando a temperatura atingir 80°, faça a leitura do dilatômetro e do cronômetro e anote na Tabela 17.2.
13. Faça a leitura do dilatômetro e do cronômetro a cada 5,0 °C perdidos. Anote os valores na Tabela 17.2, incluindo a temperatura. Cesse a leitura quando a temperatura do tubo estiver a aproximadamente 15,0° acima da temperatura ambiente.
14. Repita o procedimento para outro tubo e anote os dados na Tabela 17.3.

² Veja que o dilatômetro sofre uma variação negativa, pois a barra está encolhendo. Faça a leitura nos números pequenos do mostrador.

Dilatação linear e lei de resfriamento de Newton

Turma: _____ Data: _____

Aluno(a): _____	Matrícula: _____

17.6 Questionário

Questão 1. (1 ponto) Liste os instrumentos de medida utilizados. Descreva o tipo do equipamento, sua resolução, e seu erro de escala.

Questão 2. (2 pontos) Preencha as tabelas com o número adequado de algarismos significativos, unidades, e erros de escala apropriados.

Questão 3. (1,5 pontos)

- Elabore um gráfico³ de $|\Delta L| \times |T - T_0|$ com os dados das Tabelas 17.2 e 17.3.
- Calcule as retas que melhor representam os dados experimentais utilizando o método dos mínimos quadrados e as adicione ao gráfico.
- Utilizando os coeficientes angulares, obtenha o valor do coeficiente de expansão térmica e determine o erro percentual em comparação aos valores de referência contidos na Tabela 17.1 através da expressão

$$E\% = \left| \frac{x - x_{\text{ref}}}{x_{\text{ref}}} \right| \times 100. \quad (17.16)$$

³ Os dois conjuntos de dados devem ser representados no mesmo gráfico, possibilitando a comparação entre eles. Note ainda que o gráfico será decrescente, uma vez que estamos verificando o processo de encolhimento das barras conforme elas resfriam.

Questão 4. (2 pontos) Para os dados da Tabela 17.2, calcule o erro associado ao coeficiente angular B e determine o erro associado ao coeficiente de expansão térmica. Apresente seus cálculos.

Questão 5. (1,5 pontos)

- Elabore um gráfico linearizado de acordo com o conjunto de Equações (17.15) para os dados das Tabelas 17.2 e 17.3.
- Calcule as melhores retas através do método de mínimos quadrados e as adicione ao gráfico linearizado.
- Determine os valores da constante k através dos coeficientes angulares.

Questão 6. (2 pontos) Considerando os objetivos do experimento, listados na Seção 17.3.1, e os resultados obtidos nas questões anteriores, discuta quais objetivos foram atingidos com sucesso, justificando suas conclusões. Se algum objetivo não foi atingido, discuta quais são os possíveis motivos do insucesso e que providências podem ser tomadas para que eles sejam alcançados.

17.7 Tabelas

Tabela 17.2: Dados para a dilatação do Tubo 1.

Dados Iniciais

L_0	
T_0	
T_a	

Dados para o resfriamento

T	ΔL	t

Dados para elaboração dos gráficos

L	$T - T_0$	$T - T_a$

Tabela 17.3: Dados para a dilatação do Tubo 2.

18 Calor Específico de Sólidos

Verificaremos o calor específico de alguns materiais, buscando comprovar experimentalmente as trocas energéticas envolvidas em transferências de calor. Veremos também a explicação para os fenômenos observados segundo a Primeira Lei da Termodinâmica. Utilizaremos os seguintes conceitos/técnicas de análise de dados: medidas, algarismos significativos, gráficos, software para elaboração de gráficos, erros de escala e propagados, equação geral para o erro propagado, regressão linear, linearização, erros dos coeficientes A e B, e planilhas para cálculo dos coeficientes A e B com erros.

18.1 Princípio da conservação da energia

Sabemos que a soma da energia cinética e da energia potencial de um sistema dá origem ao que denominamos como *energia mecânica*:

$$E = K + \sum U \quad (18.1)$$

$$= \frac{mv^2}{2} + \left(mgy + \frac{kx^2}{2} + \dots \right). \quad (18.2)$$

Se em um sistema qualquer atuam somente *forças conservativas*, a energia mecânica será constante. Se existe uma *força não-conservativa*, no entanto, temos que

$$\Delta E^{\text{mec}} = W_{\text{NC}}. \quad (18.3)$$

Vamos considerar agora o que acontece com a energia em duas situações diferentes, ambas sujeitas a atuação de uma força não-conservativa.

Primeiramente, vamos considerar um bloco suspenso por uma mola e livre para oscilar. Na parte inferior do bloco, existe uma haste que está fixada a ele e cuja extremidade oposta está ligada a uma placa plana, submersa em água — veja a Figura 18.1 —. Sabemos que o deslocamento da placa dentro do fluido está sujeito a uma força de arrasto, sempre na direção contrária ao seu deslocamento. Isso implica em uma força que atua sobre o bloco através da haste, realizando trabalho negativo, fazendo com que sua energia mecânica seja diminuída a cada oscilação:

$$\Delta E^{\text{mec}} = W_{\text{NC}} \quad (18.4)$$

$$= W_{F_{\text{haste}}}. \quad (18.5)$$

Eventualmente, o movimento oscilatório cessará devido ao fato de que a energia mecânica se tornará nula. Se considerarmos o sistema formado somente pelo bloco e pela mola, podemos dizer que há uma *força externa* — a força exercida pela haste — que diminui a

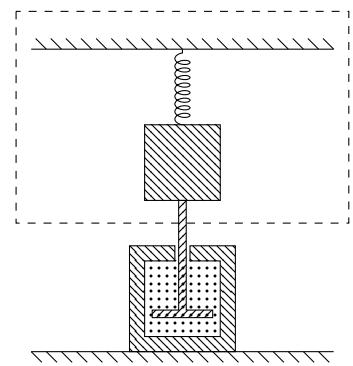


Figura 18.1: Bloco suspenso por uma mola, livre para oscilar, porém conectado a um sistema de amortecimento.

¹ Sabemos que pelo menos uma parte da energia é transferida para o fluido, manifestando-se como energia cinética.

energia mecânica do sistema. Por outro lado, verificamos também que tal força exerce um trabalho *positivo* sobre o fluido, forçando-o a se movimentar. Dessa forma, podemos dizer que o trabalho de uma força externa *transfere* a energia através da fronteira do sistema (representada na figura pelo retângulo tracejado).¹

Vamos supor agora que temos um sistema onde atuam forças conservativas e uma força não-conservativa *interna*, ou seja, uma força cujo par ação-reação esteja completamente contido dentro da fronteira do sistema. Um exemplo desse caso pode ser uma força de atrito entre um bloco e uma superfície em um sistema como o mostrado na Figura 18.2. Vamos assumir que nenhuma força externa *que realize trabalho* atue sobre tal sistema, atravessando sua fronteira — vamos desconsiderar efeitos da força de arrasto; a força normal que atua sobre o sistema é externa, porém seu trabalho é nulo —. Nessa situação, verificamos que se aplica a expressão

$$\Delta E_S = W_{NC} \quad (18.6)$$

$$= W_{at.} \quad (18.7)$$

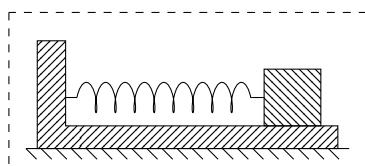


Figura 18.2: Sistema formado por um oscilador massa-mola sujeito a uma força de atrito. Se nenhuma força que atravessa a fronteira do sistema realiza trabalho, então o sistema é *fechado*.

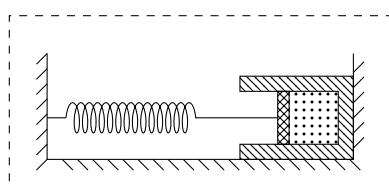


Figura 18.3: No sistema acima, a mola inicialmente armazena energia potencial elástica. Ao liberarmos para que se move, a energia mecânica sofre uma variação devido ao trabalho exercido através da haste sobre o gás.

Segundo a equação acima, a energia mecânica deve diminuir, porém estamos considerando um *sistema fechado*, ou seja, não pode haver fluxo de energia através da fronteira. Nesse momento, aparentemente deveríamos argumentar que a energia se perdeu, afinal, estamos tratando de uma situação em que atua uma força não-conservativa. Essa ideia, porém, não descreve o que acontece quando uma força não conservativa atua de maneira a realizar trabalho através da fronteira, como no caso da força exercida pela haste no exemplo anterior. Além disso, é comum em situações como a da Figura 18.2 que se note um *aumento da temperatura do sistema*, isto é, um aumento da temperatura do bloco e da superfície onde ele se apoia.

Outro sistema que apresenta uma comportamento similar ao do sistema massa-mola da Figura 18.2 é o mostrado na Figura 18.3, onde uma mola está inicialmente comprimida e está ligada a um êmbolo que pode comprimir um gás. Ao liberarmos a mola para que se expanda, verificamos uma diminuição da energia mecânica devido ao trabalho exercido sobre a mola pelo gás, através da haste. No entanto, como nenhuma força que atravessa a fronteira do sistema realiza trabalho, novamente temos uma aparente perda da energia. Mais uma vez, notamos um aumento da temperatura do sistema: ao comprirmos o gás, sua temperatura aumenta. Se, por outro lado, aumentarmos a temperatura do gás utilizando a chama de uma vela, por exemplo, vamos notar algo interessante: o gás se expande, comprimindo a mola. Ou seja, verificamos um aumento da energia mecânica do sistema. Percebemos assim que a *temperatura está ligada a uma outra forma de energia*.

Nos sistemas das Figuras 18.2 e 18.3 concluímos que a energia mecânica deve ter sido transformada em algum outro tipo de energia, que denominamos como *energia interna*, e que está relacionada à temperatura do corpo². Logo, podemos somar a variação da energia

² Microscopicamente, a energia interna associada à temperatura de um corpo está relacionada à velocidade média das partículas que o compõe: no caso da Figura 18.3, para que o gás comprima a mola ao ter sua temperatura aumentada devido à chama da vela, verificamos que a força média exercida pela colisão das moléculas do gás sobre a parede do êmbolo só pode aumentar se o número de partículas no cilindro, a massa das moléculas, ou as velocidades das moléculas aumentarem. Como os dois primeiros fatores são constantes, concluímos que a velocidade das moléculas aumenta com a temperatura.

mecânica à variação da energia interna de um sistema e escrever

$$\Delta E_S^{\text{mec}} + \Delta E_S^{\text{int}} = W_{F_{\text{ext}}}, \quad (18.8)$$

onde $W_{F_{\text{ext}}}$ representa o trabalho total efetuado por forças que atravessam a fronteira do sistema. Note que a expressão acima assume o caráter de uma *lei de conservação* para a energia do sistema, uma vez que só é possível alterá-la através do trabalho de uma força externa — isto é, de uma força que cruza a fronteira do sistema e que realize trabalho —.

18.1.1 Calor

Se a energia interna está associada à temperatura, então existe uma maneira de transferir energia para fora de um sistema que não envolve a realização de trabalho por uma força externa: se tomarmos dois sistemas distintos — como, por exemplo, dois blocos metálicos — a temperaturas diferentes, é fácil perceber que ao deixarmos que ambos fiquem em contato direto a temperatura do bloco frio aumenta e a temperatura do bloco quente diminui. A tal fluxo de energia interna denominamos *calor*³. Devemos então adicionar um termo Q à direita da Expressão (18.8), relativo ao calor transmitido:

$$\Delta E_S^{\text{mec}} + \Delta E_S^{\text{int}} = W_{F_{\text{ext}}} + Q. \quad (18.9)$$

18.1.2 Outras formas de energia, radiação

Apesar de a expressão acima ser mais geral que a Expressão (18.3), ainda podemos imaginar uma série de possibilidades que não são bem descritas por ela:

Energia química: Se, por exemplo, utilizarmos um motor elétrico ligado a uma bateria, sabemos que é possível o utilizar para alterar a energia mecânica do sistema, mesmo sem a ação de uma força externa. De fato, existe uma *energia química* armazenada na bateria que nos permite utilizar o trabalho da força não-conservativa exercida pelo motor para fazer variar a energia mecânica do sistema, ou a energia interna do sistema, ou mesmo ambas. Outra possibilidade é a de utilizar um combustível e substituir o motor elétrico por uma máquina térmica: assim como no caso da bateria, os combustíveis são uma maneira de armazenar energia química. Como esse tipo de energia tem um caráter similar à energia interna associada à temperatura, não há necessidade de alterar a Expressão (18.8).⁴

Radiação eletromagnética: Sabemos que o Sol é capaz de causar variações de temperatura na Terra, mesmo na ausência de um *meio de contato* entre ambos. Devido à ausência de tal meio, não é possível que haja transmissão de energia interna através de um fluxo de calor. Também não existe uma força que atravesse ambas as fronteiras, realizando trabalho⁵. Resta então a transmissão de energia através de *radiação eletromagnética*. A radiação eletromagnética,

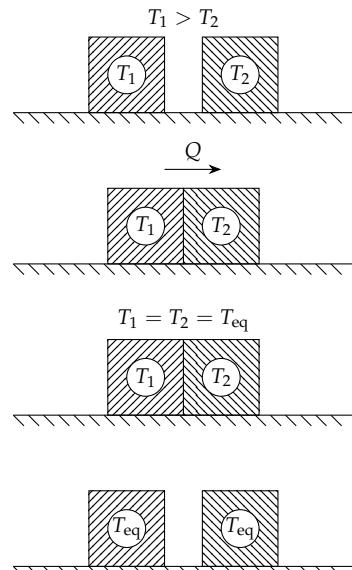


Figura 18.4: Se dois blocos a temperaturas diferentes são postos em contato, existe uma fluxo de energia interna entre eles que tende a equilibrar suas temperaturas.

³ Microscopicamente, como a temperatura dos blocos é diferente, a energia cinética média das partículas que compõe cada um deles também são diferentes. No contato direto entre ambos, as partículas do corpo quente interagem com as do corpo frio, forçando-as a oscilar. Ocorre uma transferência de energia cinética entre as partículas de cada um dos corpos através do trabalho das forças entre as cargas elétricas dos átomos.

⁴ Microscopicamente, a energia química é uma energia potencial elétrica armazenada nas configurações moleculares dos átomos.

⁵ Na verdade, a força gravitacional entre o Sol e a Terra, ou entre a Lua e a Terra, pode realizar trabalho: essa é a origem das marés. A quantidade de energia transmitida, no entanto, é muito menor que através da radiação.

é uma perturbação de caráter ondulatório nos campos elétrico e magnético que preenchem o espaço, e também é conhecida como *ondas eletromagnéticas*. Como tais campos podem existir mesmo no vácuo, as ondas eletromagnéticas podem se propagar na ausência de matéria. Representamos a radiação eletromagnética através de um termo R à direita da Expressão (18.8).

Considerando as observações acima, podemos *postular* um princípio de conservação da energia:

**Princípio da conservação da energia
(1^a Lei da Termodinâmica)**

⁶ Ao se realizar um experimento, é muito comum que parte da energia seja *dissipada* em outras formas. No entanto, se mensurarmos a quantidade de energia dissipada, ou alterarmos o aparato experimental de maneira a minimizar a perda energética, verificamos que a Equação (18.10) é sempre satisfeita. Isso, porém, é na prática extremamente difícil.

$$\Delta E_S^{\text{mec}} + \Delta E_S^{\text{int}} = W_{\text{ext}} + Q + R. \quad (18.10)$$

Tal expressão é um postulado pois não é possível prová-la: verificamos nos exemplos discutidos acima que existem indícios de que a energia é transmitida entre sistemas diferentes, através de diferentes meios, porém não é possível verificar/provar que nenhuma parte da energia é perdida. No entanto, todas as evidências experimentais levam a crer que o princípio acima é válido.⁶

Através do princípio da conservação da energia e da flexibilidade que temos ao definir um sistema, podemos nos preocupar simplesmente com o *fluxo* da energia. Isso tende a facilitar muito a interpretação de diversos problemas pois podemos nos preocupar com a origem e o destino da energia, sem nos atermos a cada detalhe dos processos físicos que ocorrem durante a transferência da energia entre uma forma e outra.

18.2 Calor Específico

Vamos considerar um corpo qualquer que repousa sobre uma mesa e pode ser posto em contato com uma fonte de calor (Figura 18.5). Se a fonte ceder uma certa quantidade de calor, podemos determinar a variação de energia interna através do princípio de conservação da energia. Obtemos então

$$\Delta E^{\text{mec}} + \Delta E^{\text{int}} = W_{\text{ext}} + Q \quad (18.11)$$

$$\Delta E^{\text{int}} = Q, \quad (18.12)$$

onde ΔE^{mec} é zero pois não há variação nem da energia cinética, nem de qualquer energia potencial. Além disso, não existe nenhum trabalho efetuado sobre o corpo, portanto W_{ext} também é zero.

Nessas condições, é possível verificar experimentalmente que

$$Q = \Delta E^{\text{int}} \quad (18.13)$$

$$= mc\Delta T, \quad (18.14)$$

onde m representa a massa do corpo, c é uma constante característica do material de que o corpo é feito — denominada *calor específico* —, e ΔT representa a variação de temperatura do corpo.

18.2.1 Capacidade Térmica

Em muitas situações temos corpos que não são feitos de um único material. Nesse caso, podemos relacionar o calor transferido para o

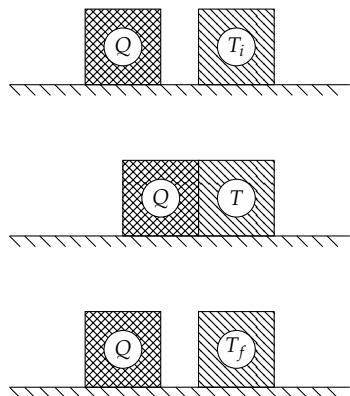


Figura 18.5: Um corpo entra em contato com uma fonte térmica, sofrendo uma variação em sua temperatura.

Material	J/kg · °C	cal/g · °C
Alumínio	900	0,215
Cobre	387	0,0924
Ferro	448	0,107
Chumbo	128	0,0305
Latão	380	0,092
Água	4186	1,00

Tabela 18.1: Calor específico para alguns materiais à temperatura de 25 °C.

corpo e a consequente variação da temperatura através da *capacidade térmica* C , de forma que

$$Q = \Delta E^{\text{int}} \quad (18.15)$$

$$= C\Delta T. \quad (18.16)$$

Note que para um corpo constituído de um único tipo de material, podemos relacionar a capacidade térmica e o calor específico através de

$$C = mc. \quad (18.17)$$

18.2.2 Determinação da Capacidade Térmica de um Calorímetro

Para que possamos determinar o calor específico utilizando um calorímetro, devemos antes de tudo determinar qual é a quantidade de calor que será absorvida pelo próprio calorímetro. Se inicialmente temos o calorímetro e dentro dele uma massa de água fria $m_{\text{fria}}^{\text{água}}$, sendo que ambos se encontram em equilíbrio térmico a uma temperatura T_i , ao adicionarmos uma massa $m_{\text{quente}}^{\text{água}}$ de água quente, a uma temperatura T_q , obteremos uma temperatura final T_f . Analisando as trocas de calor, verificamos que

$$\Delta E_S^{\text{mec}} + \Delta E_S^{\text{int}} = W_{F_{\text{ext}}} + Q + R \quad (18.18)$$

$$\Delta E_S^{\text{int}} = 0, \quad (18.19)$$

onde verificamos que não ocorrem variações de energia mecânica apreciáveis e também que não temos trocas de calor, radiação, ou trabalho de forças externas entre o calorímetro e o ambiente. Apesar de a energia interna total do sistema também não variar, a energia interna de cada componente pode variar independentemente, logo

$$\Delta E_{\text{água quente}}^{\text{int}} + \Delta E_{\text{água fria}}^{\text{int}} + \Delta E_{\text{calorímetro}}^{\text{int}} = 0. \quad (18.20)$$

Tais variações de energia interna se devem ao calor que flui entre os componentes do sistema, de forma que

$$Q_{\text{perdido}}^{\text{água quente}} + Q_{\text{ganho}}^{\text{água fria}} + Q_{\text{ganho}}^{\text{Calorímetro}} = 0. \quad (18.21)$$

Logo, se substituirmos $Q = mc\Delta T$ para o calor ganho ou perdido pela água e $Q = C\Delta T$ para o calor ganho pelo calorímetro⁷, temos

$$m_{\text{quente}}^{\text{água}} \cdot c \cdot (T_f - T_q) + m_{\text{fria}}^{\text{água}} \cdot c \cdot (T_f - T_i) + C \cdot (T_f - T_i) = 0, \quad (18.22)$$

de onde obtemos

$$C = -c \cdot \left[\frac{m_{\text{quente}}^{\text{água}} \cdot (T_f - T_q) + m_{\text{fria}}^{\text{água}} \cdot (T_f - T_i)}{(T_f - T_i)} \right]. \quad (18.23)$$

⁷ As constantes c e C representam o calor específico da água e a capacidade térmica do calorímetro, respectivamente. As variáveis T_i , T_f , e T_q representam as temperaturas da água inicial, final, e da água quente, respectivamente.

18.2.3 Determinação do Calor Específico

Para determinar o calor específico devemos tomar o calorímetro com uma massa m de água fria, ambos em equilíbrio térmico a

uma temperatura inicial T_i . Se tomarmos uma amostra aquecida a uma temperatura T_q e a adicionarmos ao calorímetro, temos após o equilíbrio uma temperatura final T_f . Analisando as trocas de calor obtemos

$$\Delta E_S^{\text{mec}} + \Delta E_S^{\text{int}} = W_{F_{\text{ext}}} + Q + R \quad (18.24)$$

$$\Delta E_S^{\text{int}} = 0, \quad (18.25)$$

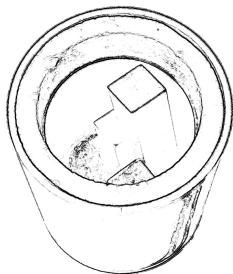


Figura 18.6: Calorímetro aberto.

onde novamente temos que não ocorrem variações de energia mecânica apreciáveis e também que não temos trocas de calor, radiação, ou trabalho de forças externas entre o calorímetro e o ambiente. Como a energia interna de cada componente pode variar independentemente,

$$\Delta E_{\text{água quente}}^{\text{int}} + \Delta E_{\text{água fria}}^{\text{int}} + \Delta E_{\text{calorímetro}}^{\text{int}} = 0, \quad (18.26)$$

o que resulta em

$$Q_{\text{perdido}}^{\text{Corpo}} + Q_{\text{ganho}}^{\text{água}} + Q_{\text{ganho}}^{\text{Calorímetro}} = 0 \quad (18.27)$$

Substituindo as expressões $Q = mc\Delta T$ para o ganho de calor pela água, $Q = m_a c_a \Delta T$ para o calor perdido pela amostra, e $Q = C\Delta T$ para o calor ganho pelo calorímetro, temos

$$m_a c_a (T_f - T_q) + mc(T_f - T_i) + C(T_f - T_i) = 0. \quad (18.28)$$

Obtemos então para o calor específico da amostra

$$c_a = - \left[\frac{(mc + C) \cdot (T_f - T_i)}{m_a (T_f - T_q)} \right] \quad (18.29)$$

18.3 Experimento

Vamos utilizar o Princípio da conservação da energia para determinar a capacidade térmica de um calorímetro. Para isso, basta adicionarmos ao calorímetro água quente a uma temperatura conhecida e verificar o ganho de massa do sistema e sua temperatura final. Após isso, podemos adicionar ao calorímetro corpos diversos — um de cada vez —, aferindo a temperatura e a massa finais do sistema. Utilizando o Princípio da Conservação da Energia mais uma vez, determinaremos o calor específico dos sólidos em questão.

18.3.1 Objetivos

1. Determinar experimentalmente o calor específicos de diferentes materiais sólidos;
2. Observar o equilíbrio térmico entre os corpos;
3. Observar a validade da Primeira Lei da Termodinâmica;

18.4 Material Necessário

- Calorímetro;
- Termômetro de haste;
- Becker com água fria;
- Becker de vidro;
- Ebulidores elétricos.
- Termômetro;
- Balança;
- Pinça;
- Corpos de diferentes materiais;
- Recipiente para descartar água.

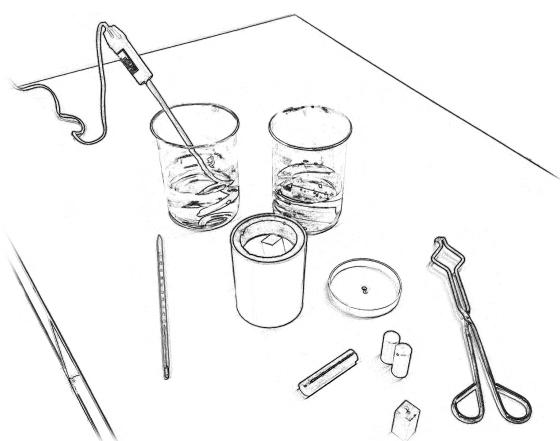


Figura 18.7: Aparato para a verificação do calor específico de sólidos.

18.5 Procedimento Experimental

18.5.1 Determinação da Capacidade Térmica do Calorímetro

1. Determine a massa m^{Cal} do calorímetro com o auxílio da balança, anote o resultado na Tabela 18.2;
2. Adicione água fria⁸ ao calorímetro até que ela cubra aproximadamente um quarto da parte metálica interna;
3. Verifique a massa $m_{\text{água fria}}^{\text{Cal}}$ do calorímetro com a água e anote na Tabela 18.2;
4. Aguarde até que o sistema entre em equilíbrio térmico. Uma vez atingido o equilíbrio, com o auxílio do termômetro, determine a temperatura inicial T_i do calorímetro e a anote na Tabela 18.2. A partir de agora, mantenha o calorímetro sempre tampado;

⁸ Aqui “água fria” se refere à água a qualquer temperatura significativamente menor que a temperatura da água quente utilizada. Se a temperatura da água quente for de aproximadamente 100,0 °C, por exemplo, para os nossos propósitos podemos considerar água à temperatura ambiente como fria.

5. Verifique a temperatura da água quente disponível e anote na Tabela 18.2;
6. Imediatamente após verificar a temperatura da água quente, adicione água quente ao calorímetro até cobrir aproximadamente a metade da cuba metálica interna. Aguarde o equilíbrio e verifique a temperatura final T_f do calorímetro, anotando na Tabela 18.2;
7. Verifique a massa final $m_{\text{água fria+quente}}^{\text{Cal}}$ do sistema;
8. Descarte a água do calorímetro e repita o procedimento descrito acima mais duas vezes, anotando os dados na Tabela 18.2

18.5.2 Determinação do calor específico de sólidos

1. Determine a massa m^{Cal} do calorímetro com o auxílio da balança, anote o resultado na Tabela 18.3;
2. Adicione água fria ao calorímetro até que ela cubra aproximadamente um quarto da parte metálica interna;
3. Verifique a massa $m_{\text{água fria}}^{\text{Cal}}$ do calorímetro com a água fria e anote na Tabela 18.3;
4. Aguarde até que o sistema entre em equilíbrio térmico. Uma vez atingido o equilíbrio, com o auxílio do termômetro, determine a temperatura inicial T_i do calorímetro e a anote na Tabela 18.3. A partir de agora, mantenha o calorímetro sempre tampado;
5. Tome um dos materiais à sua escolha⁹ e o submerja na água quente. Aguarde até que a amostra entre em equilíbrio térmico com a água. Verifique a temperatura T_{amostra} do banho térmico e anote na Tabela 18.3.
6. Retire a amostra do banho quente e a coloque rapidamente no calorímetro. Aguarde o equilíbrio térmico¹⁰ e verifique temperatura final T_f do calorímetro. Anote os resultados na Tabela 18.3.
7. Retire a amostra do calorímetro, seque-a e verifique sua massa¹¹ m_a com o auxílio da balança e a anote na Tabela 18.3.
8. Repita o procedimento acima mais duas vezes para o mesmo material. Após finalizar os procedimentos para o material em questão, repita o procedimento para outro material, também por três vezes, anotando os resultados na Tabela 18.4.

⁹ Se houver mais que uma amostra do mesmo material disponível, tome mais que uma. Quanto maior for a massa, menor será o erro na determinação do calor específico.

¹⁰ Se as amostras forem metálicas, o equilíbrio será atingido rapidamente. Não aguarde um tempo muito longo pois nesse caso a energia térmica perdida pelo calorímetro para o ambiente será significativa.

¹¹ Caso a amostra do material seja um corpo rígido, não é necessário aferir sua massa novamente.

Calor Específico de Sólidos

Turma: _____ Data: _____

Aluno(a): _____	Matrícula: _____

18.6 Questionário

Questão 1. (1 ponto) Liste os instrumentos de medida utilizados. Descreva o tipo do equipamento, sua resolução, e seu erro de escala.

Questão 2. (2 pontos) Preencha as tabelas com o número adequado de algarismos significativos, unidades, e erros de escala apropriados.

Questão 3. (2 pontos) Calcule a capacidade térmica do calorímetro, juntamente com o erro propagado, para as três medidas realizadas. Obtenha o valor médio e o erro associado. Apresente os cálculos realizados.

Questão 4. (3 pontos)

- Utilizando o resultado para a capacidade térmica do calorímetro e o erro associado a tal medida, calcule os calores específicos dos materiais, incluindo o erro propagado, para cada uma das três medidas de cada material. Obtenha o valor médio e o erro propagado para cada material. Apresente os cálculos realizados.
- Identifique o material e compare o resultado obtido para o calor específico com os valores de referência na Tabela 18.1. Calcule os erros percentuais utilizando

$$E_{\%} = \left| \frac{x - x_{\text{ref}}}{x_{\text{ref}}} \right| \times 100. \quad (18.30)$$

Questão 5. (2 pontos) Considerando os objetivos do experimento, listados na Seção 18.3.1, e os resultados obtidos nas questões anteriores, discuta quais objetivos foram atingidos com sucesso, justificando suas conclusões. Se algum objetivo não foi atingido, discuta quais são os possíveis motivos do insucessos e que providências podem ser tomadas para que eles sejam alcançados.

18.7 Tabelas

Determinação da Capacidade Térmica do calorímetro**Massas**

m^{Cal}	$m_{\text{água fria}}^{\text{Cal}}$	$m_{\text{água fria+quente}}^{\text{Cal}}$	$m_{\text{água fria}}$	$m_{\text{água quente}}$

Temperaturas

T_i	$T_{\text{água quente}}$	T_f	$T_f - T_i$	$T_f - T_{\text{água quente}}$

Tabela 18.2: Dados para o cálculo da capacidade térmica do calorímetro.

Determinação do Calor Específico, Material N° 1**Massas**

m^{Cal}	$m_{\text{água fria}}^{\text{Cal}}$	m_a	$m_{\text{água fria}}$

Temperaturas

T_i	T_{amostra}	T_f	$T_f - T_i$	$T_f - T_{\text{amostra}}$

Tabela 18.3: Dados para o cálculo do calor específico.

Determinação do Calor Específico, Material N° 2

Massas

m^{Cal}	$m_{\text{água fria}}^{\text{Cal}}$	m_a	$m_{\text{água fria}}$

Temperaturas

T_i	T_{amostra}	T_f	$T_f - T_i$	$T_f - T_{\text{amostra}}$

Tabela 18.4: Dados para o cálculo do calor específico.

19 Zero absoluto

Realizaremos um experimento em que verificaremos a pressão exercida por uma quantidade de gás com volume constante em função de sua temperatura. Através desses dados, determinaremos a temperatura para a qual teríamos uma pressão nula — tal temperatura é o que denominamos como Zero Absoluto —. Utilizaremos os seguintes conceitos/técnicas de análise de dados: medidas, algarismos significativos, gráficos, software para elaboração de gráficos, erros de escala e propagados, equação geral para o erro propagado, regressão linear, linearização, erros dos coeficientes A e B , e planilhas para cálculo dos coeficientes A e B com erros.

19.1 Termômetros

Um método simples para verificar a temperatura é utilizar alguma propriedade de um material que varie com a temperatura como indicador de leitura. Muitos termômetros empregados rotineiramente em laboratórios usam mercúrio, outros usam álcool. Em ambos os casos, a propriedade que varia com a temperatura é o volume: o líquido de um reservatório se dilata e invade um tubo fino, onde a altura da coluna pode ser lida através de uma escala.

Outras propriedades podem ser utilizadas para verificar a temperatura, dentre elas a diferença de potencial elétrico entre uma junção bimetálica, a resistência elétrica de um material, o comprimento de uma fita metálica longa, a pressão de um volume confinado de um gás, etc.

Em todos esses casos, é necessário se utilizar dois pontos para calibrar o termômetro com valores arbitrários de temperatura. A escala Celsius, por exemplo, utiliza a temperatura de fusão do gelo para zero graus e a temperatura de ebulição da água para 100 graus. No caso de um termômetro de mercúrio, podemos verificar a altura da coluna para a temperatura de fusão do gelo, realizando uma marca (na escala Celsius, 0°). Marcamos também a altura da coluna para a temperatura de ebulição da água (100°). Dividimos então o intervalo entre essas duas marcas em um número de divisões menores. Podemos então verificar qualquer temperatura intermediária utilizando uma leitura da coluna de mercúrio. Podemos inclusive extrapolar as leituras para valores de temperatura maiores e menores que os extremos definidos pela temperatura de fusão do gelo e de ebulição da água, bastando para isso manter o tamanho da divisão igual às divisões intermediárias.

A confiabilidade das medidas de temperatura obtidas através de um termômetro está diretamente ligada à linearidade da propriedade observada com a variação da temperatura. Para faixas de tempera-

¹ Nesse caso, podemos verificar a temperatura através do espectro da radiação emitida pelo corpo em questão.

² As temperaturas devem estar na escala Kelvin, discutida adiante.

tura relativamente pequenas, isso pode não ser um problema, mas se desejarmos realizar medições para uma ampla faixa de valores, comportamentos não-lineares podem ter efeito significativo. Além disso, se — por exemplo — desejarmos utilizar uma medida de temperatura extremamente elevada, não podemos utilizar um termômetro devido ao risco de danificá-lo¹. Portanto, é importante escolher um material e uma propriedade adequados à medida em questão.

19.1.1 Termômetros de gás a volume constante

Uma propriedade que pode ser utilizada para realizar uma medida confiável da temperatura é a pressão de um gás mantido em um volume constante. Segundo a equação dos gases ideais, a pressão varia com a temperatura de acordo com²

$$PV = nRT, \quad (19.1)$$

onde R é a constante dos gases, n é o número de moles de partículas do gás, V é o volume ocupado pelo gás, e T é a temperatura. Dessa equação, podemos escrever

$$P = \frac{nR}{V} T. \quad (19.2)$$

Para um gás real, a relação entre a pressão e a temperatura depende do tipo de gás utilizado. Porém, se o gás estiver a baixa pressão, ou seja, estiver *rarefeito*, e a temperatura a ser medida for maior que aquela em que o gás se torna um líquido, podemos utilizar qualquer gás para realizar medidas de temperatura. A diferença entre diversos gases será a inclinação da reta, porém as relações serão sempre lineares (Figura 19.1).

Para um gás mantido a um volume V constante em um reservatório hermético, podemos afirmar que o número de moles n se mantém constante. Temos então uma relação de proporcionalidade entre a pressão do gás e a temperatura a que ele se encontra. Um dispositivo que utiliza essa propriedade para realizar medidas é denominado *termômetro de gás a volume constante*.

A Figura 19.2 mostra um desenho esquemático de um dispositivo desse tipo: nela temos um balão de destilação fechado com uma rolha e em cuja saída lateral está conectada um tubo flexível, sendo que a outra extremidade é aberta. Dentro do tubo temos um fluido de densidade conhecida. O balão fica submerso em um banho térmico cuja temperatura estamos interessados em medir.

Como a extremidade livre do tubo é aberta, ela está sujeita à pressão atmosférica, logo, a pressão do gás dentro do balão será determinada pela soma da pressão atmosférica com a pressão exercida pela coluna de líquido:

$$P = P_0 + \rho gh, \quad (19.3)$$

onde P_0 é a pressão atmosférica, ρ é a densidade do fluido dentro do tubo, g é a aceleração da gravidade e h é a altura³ (veja a Figura 19.3).

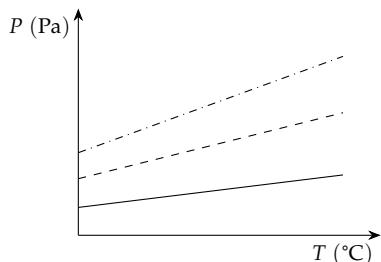


Figura 19.1: Para um gás real, a relação entre P e T depende do gás, porém é sempre linear.

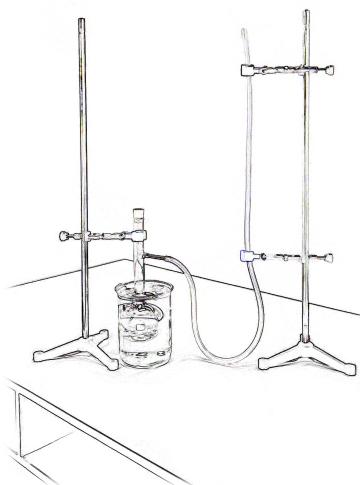


Figura 19.2: Termômetro de gás a volume constante.

³Note que h é a *altura* da coluna, não seu comprimento. Tal distância deve ser medida *verticalmente*.

Para determinarmos o valor da altura da coluna de fluido adequadamente, devemos nos certificar que o volume de gás dentro do balão seja mantido constante. Para isso, devemos verificar a posição da coluna de fluido na extremidade do tubo que está ligada ao balão e marcarmos sua posição para referência futura (tal marca é representada pela seta na Figura 19.3). Ao aquecermos o gás, o fluido no tubo se deslocará devido à pressão exercida sobre ele, fazendo com que as posições dos topes das colunas em ambas as extremidades do tubo mudem de posição. Para que o gás volte ao volume inicial, o topo da coluna da extremidade do tubo ligada ao balão deve voltar ao nível original, o que pode ser feito deslocando a extremidade livre para cima. Só então devemos aferir a distância vertical h entre as colunas.

Como sabemos que existe uma relação linear da temperatura com a pressão, e uma relação linear da pressão com a altura h da coluna, podemos determinar uma relação linear entre a temperatura T e a altura h : de acordo com a Equação (19.2), podemos escrever

$$T = \frac{V}{nR}P, \quad (19.4)$$

ou, usando a Equação (19.3),

$$T = \frac{V}{nR}(P_0 + \rho gh) \quad (19.5)$$

$$= \frac{VP_0}{nR} + \frac{V\rho g}{nR}h. \quad (19.6)$$

Para que possamos definir valores numéricos específicos de temperatura, precisamos de duas temperaturas de referência, como as de fusão e ebulação da água, por exemplo. Uma vez determinados os valores arbitrários de temperatura T_f e T_e e as alturas h_f e h_e correspondentes a tais temperaturas, podemos determinar a relação entre T e h considerando que a tal relação é linear, o que implica em uma forma dada por

$$T = Bh + A, \quad (19.7)$$

onde

$$\begin{cases} Bh_e + A = T_e \\ Bh_f + A = T_f \end{cases} \quad (19.8)$$

Resolvendo esse sistema, obtemos

$$B = \frac{T_e - T_f}{h_e - h_f} \quad (19.9)$$

$$A = T_f - \frac{T_e - T_f}{h_e - h_f}h_f, \quad (19.10)$$

de onde obtemos

$$T = (h - h_f)\frac{T_e - T_f}{h_e - h_f} + T_f. \quad (19.11)$$

19.1.2 Zero absoluto

Para qualquer gás utilizado no termômetro, a medida que a temperatura diminui, a pressão do gás também diminui. Essa relação deve ter

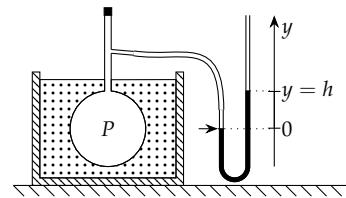


Figura 19.3: A pressão do gás pode ser determinada pela soma da pressão atmosférica com a pressão exercida pela coluna d'água cuja altura é h . O gás deve ser mantido a volume constante, o que implica que a coluna d'água na extremidade do tubo ligado ao balão deve ser mantida na marca de referência indicada pela flecha.

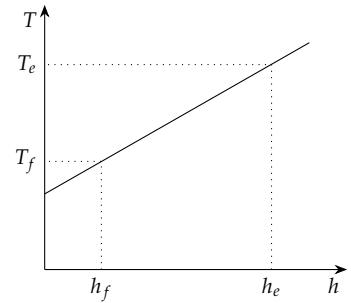
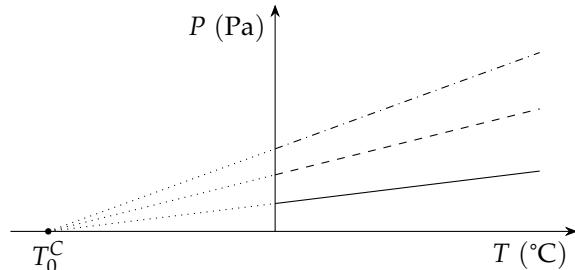


Figura 19.4: A relação entre a temperatura T e a altura h é linear, o que nos permite utilizá-la como a escala de um termômetro.

um valor para o qual a pressão exercida pelo gás é nula, correspondendo a uma temperatura mínima ou um *zero absoluto* para a escala de temperatura. Apesar de a inclinação das retas de $P \times T$ serem diferentes para gases diferentes, o valor para o qual a pressão é zero é o mesmo para qualquer gás, sendo que tal valor é determinado experimentalmente, correspondendo na escala Celsius a $T_0^C = -273,15^\circ\text{C}$.

Figura 19.5: Extrapolando a relação entre P e T para qualquer gás, obtemos sempre o mesmo valor de temperatura para o qual a pressão será nula. No caso da escala Celsius, tal valor corresponde a $T_0^C = -273,15^\circ\text{C}$.



Podemos então utilizar o valor do zero absoluto para definir uma escala de temperaturas — a escala Kelvin — em que a menor temperatura possível seja zero, correspondendo ao zero absoluto, e na qual a temperatura de fusão do gelo seja 273,15 K, sendo que a relação entre tal escala e a escala Celsius será dada por

$$T_K = T_C + 273,15. \quad (19.12)$$

De acordo com a interpretação cinética para os gases, a pressão exercida pelo gás está relacionada à energia cinética das partículas que o compõe: a pressão é exercida nas paredes de um recipiente pelas colisões sucessivas das partículas. Ao se atingir o zero absoluto, a pressão e a energia cinética serão nulas⁴, o que corresponderia classicamente a todas as partículas do gás repousarem no fundo do recipiente que as contém.

19.1.3 Determinação do zero absoluto

Se tomarmos um termômetro de gás a volume constante como o da Figura 19.2, podemos determinar o valor do zero absoluto com o auxílio de um segundo termômetro. Para isso, basta tomarmos dados da pressão do gás no balão, em função da temperatura do banho térmico no qual o balão está submerso.

Para isso, observamos que — através da expressão para a pressão de um gás ideal e da Equação (19.12) entre as temperaturas na escala Kelvin e na escala Celsius — obtemos a seguinte relação:

$$PV = nRT_K \quad (19.13)$$

$$= nR(T_C + T_0) \quad (19.14)$$

$$= nRT_C + nRT_0, \quad (19.15)$$

onde T_0 corresponde à diferença entre as escalas Celsius e Kelvin, o que corresponde a 273,15. Podemos então escrever a relação

$$P = \frac{nR}{V}T_C + \frac{nR}{V}T_0. \quad (19.16)$$

⁴ Se não há pressão, isso só pode ser explicado pela ausência de colisões entre as partículas do gás e as paredes do recipiente, o que implica que as partículas estão em repouso em relação ao recipiente e que — consequentemente — suas energias cinéticas são nulas.

Se o volume V do gás é mantido constante, a expressão acima segue um comportamento linear. Comparando-a à equação da reta $y = Bx + A$, verificamos que

$$B = \frac{nR}{V} \quad (19.17)$$

$$A = \frac{nR}{V} T_0, \quad (19.18)$$

de onde obtemos

$$T_0 = \frac{A}{B}. \quad (19.19)$$

Ao verificar os valores de pressão P em função da temperatura T utilizando o aparato da Figura 19.12, podemos determinar os valores de A e B , de onde podemos calcular o valor do zero absoluto na escala Celsius experimentalmente, um vez que

$$T_0^C = -T_0. \quad (19.20)$$

19.2 Experimento

Vamos submeter um gás a um processo de resfriamento a volume constante e verificar sua pressão como função da temperatura. Para isso, vamos usar um balão de destilação em um banho térmico, sendo que sua abertura superior é vedada com uma rolha e em cuja saída lateral é ligada uma mangueira longa e flexível. Dentro da mangueira, que é disposta em forma de U, temos um volume de água que segue o mesmo perfil em U que a mangueira e impede que o gás do balão possa sair. Vamos adicionar uma quantidade de água quente, o que aumentará rapidamente a pressão do gás dentro do balão, exigindo que a coluna d'água no segmento livre da mangueira seja mais alta do que no segmento ligada ao balão para que as pressões em ambos os segmentos fiquem equalizadas.

Conforme a temperatura diminui devido ao resfriamento do gás por perda de calor para o ambiente, o gás se contrai e permite que a coluna d'água na extremidade ligada ao balão suba, com uma consequente diminuição da altura da coluna d'água na extremidade livre da mangueira. Para que o volume do gás no balão seja mantido constante, é necessário que a extremidade livre da mangueira seja baixada constantemente. A pressão sobre o gás pode então ser determinada ao somarmos a pressão atmosférica à pressão exercida pela coluna d'água na extremidade livre da mangueira que excede a coluna d'água na extremidade ligada ao balão. Já a temperatura do gás pode ser determinada pela aferição da temperatura do banho térmico.

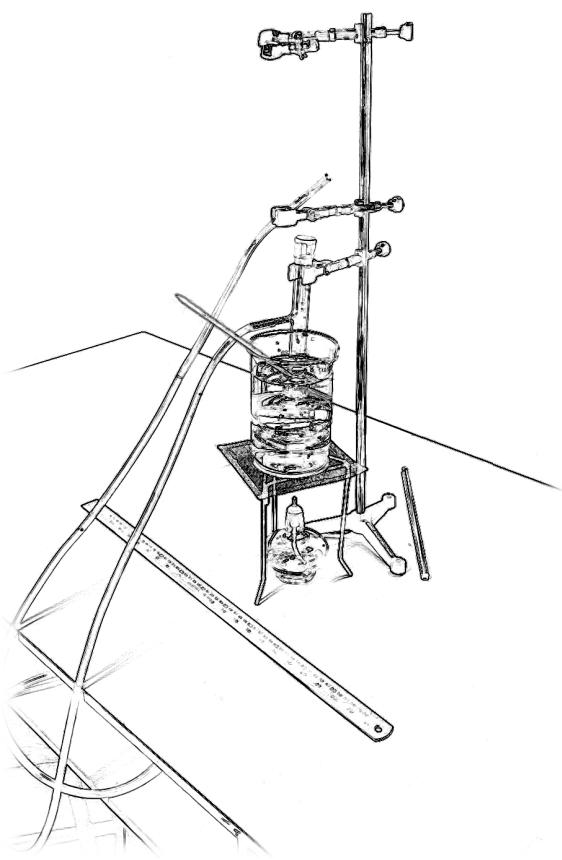
19.2.1 Objetivos

1. Verificar que a relação entre a pressão de um gás com a temperatura é linear.
2. Calcular o valor do zero absoluto na escala Celsius.

19.3 Material Necessário

- Becker;
- Balão de destilação com saída lateral;
- Rolha;
- Suporte vertical com garras;
- Termômetro;
- Tubo flexível transparente longo;
- Régulas e trenas;
- Bastão de vidro;
- Recipiente com água;
- Aquecedor elétrico;
- Flanela.

Figura 19.6: Aparato para a verificação do zero absoluto.



19.4 Procedimento Experimental

19.4.1 Montagem do aparato

1. Adicione 300 mL de água ao becker de vidro (com capacidade de 1,0 L);
2. Coloque o balão de destilação dentro do becker, de maneira que ele fique próximo do fundo e o afixe usando a garra lateral e o suporte vertical;

3. Em um segundo becker, aqueça água até uma temperatura de aproximadamente 85 °C;
4. Insira o termômetro no becker com o balão;
5. Adicione a água quente ao becker com o balão lentamente, cobrindo a parte arredondada e parte do gargalo. *Atenção: observe o nível de água dentro da mangueira e pare de adicionar água se ele começar a chegar próximo de 30 cm da extremidade livre da mangueira.*
6. Agite a água do becker com o balão com o bastão de vidro até que a temperatura estabilize;
7. Erga a extremidade livre da mangueira de forma que o nível de água na extremidade ligada ao balão fique no mesmo nível da superfície superior da mesa.⁵ *Atenção: Tome cuidado para que o nível não suba exageradamente e a água entorne dentro do balão.*

19.4.2 Coleta dos dados experimentais

1. Verifique a pressão atmosférica P_0 e a anote na Tabela 19.1;
2. Verifique a temperatura da água e a anote na Tabela 19.1.
3. Verifique a *distância vertical*⁶ h entre os topos das colunas d'água nas duas extremidades da mangueira (Veja a Figura 19.3) e a anote na Tabela 19.1.⁷
4. Assim que a temperatura diminuir aproximadamente 2 °C, levante a extremidade livre do tubo de forma que o nível na extremidade ligada ao balão volte ao nível da mesa. Verifique a nova altura vertical h entre as colunas d'água e anote os valores aferidos para a temperatura e a distância na Tabela 19.1 junto com a temperatura aferida.
5. Repita o processo do item anterior obtendo pelo menos cinco pontos experimentais.

⁵ Pode ser necessário usar uma banqueta sobre a mesa para apoiar a haste vertical que suporta a extremidade livre da mangueira.

⁶ Veja a Figura 19.3.

⁷ Como ajustamos a altura do nível da coluna d'água na extremidade ligada ao balão para que ele corresponesse ao da mesa, basta verificarmos a altura em relação à superfície da mesa.

Zero absoluto

Turma: _____ Data: _____

Aluno(a): _____	Matrícula: _____

19.5 Questionário

Questão 1. (1 ponto) Liste os instrumentos de medida utilizados. Descreva o tipo do equipamento, sua resolução, e seu erro de escala.

Questão 2. (2 pontos) Preencha as tabelas com o número adequado de algarismos significativos, unidades, e erros de escala apropriados.

Questão 3. (2 pontos)

- i. Elabore um gráfico de $P \times T$ para os dados da Tabela 19.1.
- ii. Calcule a reta que melhor representa os dados experimentais utilizando o método dos mínimos quadrados e a adicione ao gráfico.
- iii. Utilizando as Equações 19.19 e 19.20 e os coeficientes obtidos através da regressão linear, calcule o valor de temperatura para o qual a pressão será zero (zero absoluto).
- iv. Verifique o erro percentual entre o valor do zero absoluto e o valor de referência $T_0^{\text{ref}} = -273,15^\circ\text{C}$ através da expressão

$$E\% = \left| \frac{x - x_{\text{ref}}}{x_{\text{ref}}} \right| \times 100. \quad (19.21)$$

Questão 4. (3 pontos) Calcule os erros associados aos coeficientes A e B da regressão linear e — a partir dos coeficientes, dos erros a eles associados, e das Equações 19.19 e 19.20 — calcule o erro associado a T_C^0 . Apresente seus cálculos.

Questão 5. (2 pontos) Considerando os objetivos do experimento, listados na Seção 19.2.1, e os resultados obtidos nas questões anteriores, discuta quais objetivos foram atingidos com sucesso, justificando suas conclusões. Se algum objetivo não foi atingido, discuta quais são os possíveis motivos do insucesso e que providências podem ser tomadas para que eles sejam alcançados.

19.6 *Tabelas*

Constantes

P_0	
ρ	

Dados para a altura da coluna

T	h	P

Tabela 19.1: Dados para a altura da coluna de água em função da temperatura.

20 Eletromagnetismo e medidas elétricas

Faremos alguns experimentos demonstrativos para verificar os conceitos mais fundamentais de eletricidade e magnetismo. Após isso, nos familiarizaremos com o multímetro, o que nos permitirá determinar propriedades importantes de alguns sistemas que empregam eletricidade.

20.1 Conceitos básicos de eletromagnetismo

O eletromagnetismo é a teoria física que descreve os fenômenos físicos que têm origem na interação entre partículas dotadas de carga elétrica. A força eletromagnética é uma das forças fundamentais da natureza e a carga elétrica é uma propriedade característica das partículas, sendo que ela não pode ser alterada. As interações eletromagnéticas determinam a formação dos elementos químicos e de suas propriedades e são de especial interesse por sua ampla aplicação prática.

Verificaremos a seguir alguns experimentos demonstrativos simples, porém interessantes para começarmos a explorar os fenômenos eletromagnéticos. Inicialmente, no entanto, precisamos de algumas definições:

Carga elétrica: É uma propriedade¹ intrínseca das partículas que interagem através de forças eletromagnéticas. Tem um valor numérico e pode ser positiva ou negativa. No caso de uma partícula que não interage através de forças eletromagnéticas, dizemos que sua carga é nula, ou que é neutra. A unidade de carga no SI é o coulomb, representado por C. É interessante notar que a carga elétrica é sempre um múltiplo da carga² de um elétron, sendo que $e = 1,602\,176\,63 \cdot 10^{-19}$ C, dizemos — portanto — que a carga é uma variável *quantizada*. Para cargas grandes, como a armazenada em um capacitor, no entanto, não é possível perceber a quantização, por isso tratamos a carga como uma variável contínua.

¹ Quando precisamos representar quantidades de carga em equações geralmente usamos as letras q ou Q .

² Como a carga de um elétron é o valor elementar de carga, usamos e como uma variável especial para designá-la.

Corrente elétrica: Quando um conjunto de partículas carregadas se desloca, temos uma corrente elétrica i . Medimos a intensidade da corrente elétrica como a razão entre a carga total e o tempo de duração do fluxo de carga, ou, admitindo que tenhamos um fluxo contínuo de carga,

$$i = \frac{dq}{dt}. \quad (20.1)$$

A unidade de corrente elétrica é o ampere, representado por A,

definido como

$$1 \text{ A} = 1 \text{ C/s}. \quad (20.2)$$

³ Existem também os *semicondutores*, que podem se comportar como condutores ou isolantes dependendo de circunstâncias específicas, o que os torna especialmente interessantes na construção de circuitos eletrônicos.

⁴ Definiremos o *potencial elétrico* adiante.

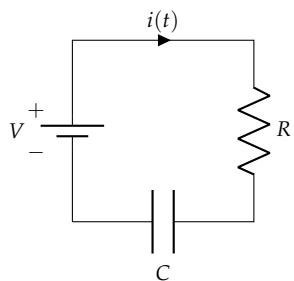


Figura 20.1: O sentido da corrente elétrica depende os tipo de carga elétrica que se move. Na maior parte dos casos, no entanto, podemos considerar a corrente convencional, onde se assumem que as cargas são positivas. Na figura, temos um exemplo de um circuito formado por uma fonte de tensão (V), um resistor (R), e um capacitor (C). Note que a corrente $i(t)$ segue pelos condutores (representados por linhas) saindo do polo positivo da fonte de tensão e indo em direção ao polo negativo.

É importante observar que os materiais podem ser divididos em duas grandes categorias, os *condutores* e os *isolantes* (ou *dielétricos*) segundo suas capacidades de permitir ou não a passagem de correntes elétricas.³ Devemos observar ainda que os isolantes podem se tornar condutores caso a *diferença de potencial elétrico*⁴ a que ele está submetido seja grande o suficiente.

Note ainda que temos dois sinais possíveis para a carga elétrica, o que pode trazer algumas complicações para a análise da corrente. Convencionalmente, se assume que a corrente elétrica se dá no sentido em que se deslocariam cargas positivas (do polo positivo de uma bateria em direção ao polo negativo). No entanto, na maioria dos materiais temos uma corrente de elétrons, que são cargas negativas. Além disso, temos materiais semi-condutores, onde a corrente se dá por deslocamento de “buracos” (ausência de elétrons), que se comportam como partículas de carga positiva. Geralmente não existe diferença em tratar a corrente real ou a convencional, porém em alguns experimentos essa diferenciação deve ser levada em conta (como no caso do efeito Hall). Finalmente, no caso de soluções iônicas e de plasmas temos tanto o fluxo de partículas positivas, quanto o de partículas negativas.

A corrente é um parâmetro importante em sistemas elétricos e nos preocuparemos em realizar medidas precisas de sua intensidade.

Circuitos elétricos: As propriedades elétricas dos materiais são de especial interesse por suas aplicações práticas. Diversos tipos de componentes eletrônicos com funções variadas podem ser fabricados utilizando diferentes tipos de materiais. Estes componentes, por sua vez, são empregados na elaboração de *circuitos elétricos* que podem desempenhar funções simples (acender uma lâmpada, por exemplo), ou funções complexas (como um computador, ou uma câmera). Verificaremos algumas propriedades básicas de circuitos elétricos nesse experimento e nos que o seguem. Para isso, frequentemente empregaremos circuitos elétricos simples.

Para facilitar o entendimento dos circuitos, é comum que sejam desenhados *esquemas elétricos*. Nesses esquemas os diferentes tipos de componentes são representados usando símbolos específicos, enquanto os condutores que os ligam são representados por linhas. São especialmente úteis para entender as relações entre as tensões e correntes nos diferentes pontos do circuito. Na Figura 20.1 temos um esquema de um circuito formado por uma fonte de tensão, um resistor, e um capacitor. Ao longo desse e dos próximos experimentos, verificaremos as características de tais componentes.

Ligações em série e em paralelo: Os componentes elétricos podem ser conectados em dois tipos básicos: em série ou em paralelo. Uma conexão em série é aquela em que a corrente elétrica passa pelos

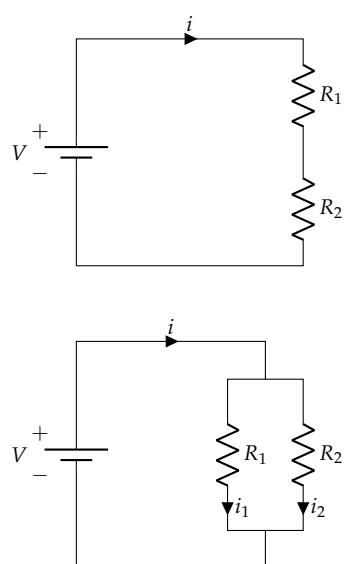


Figura 20.2: Quando uma mesma corrente passa em um conjunto de componentes (circuito superior), dizemos que eles estão ligados *em série*. Caso a corrente se divida entre os componentes do conjunto (circuito inferior), dizemos que eles estão *paralelo*.

componentes em sucessão. Já uma conexão em paralelo, a corrente se separa em duas ou mais partes e passa através dos componentes, voltado a se concentrar após passar pelos componentes.

Campo elétrico: O campo elétrico \vec{E} é um campo vetorial obtido através da verificação da direção da força eletrostática exercida por uma carga sobre uma carga de teste. Essa carga de teste deve ser pequena o suficiente para não perturbar apreciavelmente a carga cujo campo elétrico estamos tentando medir. A intensidade do campo elétrico é dado pela razão entre o módulo da força e o valor da carga de teste. Assim, seu valor é dado em newtons por coulomb, N/C.

Ainda que inicialmente o campo elétrico possa ser considerado somente um artifício de visualização da interação entre as cargas elétricas, verificamos que alguns conceitos são entendidos somente considerando sua existência (ondas eletromagnéticas, armazenamento de energia em um campo no espaço, etc.). Consequentemente, o campo elétrico aparece com frequência em equações envolvendo grandezas do eletromagnetismo.⁵

Campo magnético: De maneira similar ao caso do campo elétrico, podemos definir a direção de um campo magnético \vec{B} usando um bússola de teste. A direção do campo em um ponto do espaço é aquela para a qual aponta a agulha da bússola. Já a intensidade do campo magnético é algo mais complexo de se definir. Em termos práticos, é mais fácil utilizar a *força magnética sobre uma carga elétrica em movimento*. Tal força é experimentada por uma partícula que se move em um campo magnético, sendo que sua direção é perpendicular tanto à direção do campo magnético, quanto à direção do vetor velocidade. A expressão para a força é

$$\vec{F}_B = q\vec{v} \times \vec{B}. \quad (20.3)$$

Consequentemente, definimos a intensidade do campo de forma que o produto vetorial acima descreva a intensidade de força experimentada pela partícula.

A unidade no SI para o campo magnético é o tesla, representado por T, sendo que

$$1 \text{ T} = 1 \text{ N/C} \cdot \text{m/s} = 1 \text{ N/A} \cdot \text{m}. \quad (20.4)$$

É interessante notar ainda que a força dada pela Equação 20.3 é perpendicular ao vetor velocidade instantânea da partícula. Consequentemente, ele não é capaz de causar uma aceleração tangencial e não pode mudar o módulo da velocidade, apenas a sua direção. Isso significa que a força realizada por um campo magnético sobre uma partícula não pode mudar a sua energia cinética, isto é, a força não realiza trabalho sobre a partícula.

Potencial elétrico e tensão: De um ponto de vista energético, quando ocorre o deslocamento de uma quantidade de carga na presença

⁵ As Equações de Maxwell, que são as equações fundamentais do eletromagnetismo são descritas em termos dos campos elétricos e magnéticos e das relações entre esses dois.

de um campo elétrico temos a realização de certa quantidade de trabalho sobre as cargas. Como a força eletrostática é conservativa, existe uma *energia potencial* associada a ela. Se considerarmos a energia por quantidade de carga, temos o que chamamos de *potencial elétrico* e à diferença de potencial elétrico damos o nome de *tensão* (ou *ddp*, ou *voltagem*).

A tensão também é uma variável muito importante de um ponto de vista prático em todos os sistemas elétricos que usamos diariamente e será um dos parâmetros que nos preocuparemos em medir.

Resistência: Sempre que um corpo condutor é submetido a uma diferença de potencial (tensão) entre suas extremidades, ocorre uma transferência de carga entre a região de alto potencial elétrico para a região de baixo potencial elétrico na forma de uma corrente elétrica. No entanto, cada corpo manifesta uma relação diferente entre a tensão a que está sujeito e a corrente registrada. Calculando a razão entre essas grandezas temos

$$R = \frac{V}{i}. \quad (20.5)$$

A variável R é denominada *resistência* e a sua unidade de medida é o ohm, representado por Ω . Note ainda que o valor da resistência pode ser constante ou variar de acordo com o valor da corrente elétrica. Caso ela seja constante, o corpo é classificado como um *resistor ôhmico*.⁶

20.1.1 Experimentos demonstrativos em eletromagnetismo

Efeito triboelétrico

O efeito triboelétrico é um fenômeno em que elétrons são transferidos de um material para outro quando eles são esfregados. Diversos materiais apresentam tal propriedade e o nome “elétron” tem origem no grego ‘elektron’ (ἤλεκτρον), palavra para ‘âmbar’, pois tal material é um dos que exibe este fenômeno. Observa-se que após a eletrização ocorre uma força atrativa entre os materiais que foram esfregados.

Por outro lado, quando a carga de qualquer um desses corpos é transmitida a um eletroscópio — aparato que consiste em duas lâminas condutoras muito leves ligadas a um mesmo condutor e que podem se mover — observamos que ocorre um afastamento entre as lâminas. Consequentemente, conclui-se que existem dois tipos de carga, sendo que corpos que possuem a carga elétrica de mesmo tipo sofrem a ação de uma força repulsiva e corpos que possuem cargas elétricas de diferentes tipos estão sujeitos a uma força atrativa.

Gerador de Van de Graaff

O gerador de Van de Graaff utiliza o efeito triboelétrico entre um correia de borracha e um condutor para transferir continuamente elétrons para a parte interna de uma cúpula metálica. Devido às

⁶O termo ‘resistor’ é comumente utilizado para designar um componente de um circuito elétrico cuja função é oferecer uma resistência à passagem de corrente.

forças repulsivas entre os elétrons, eles se acumulam na parte externa da cúpula e sempre é possível adicionar mais elétrons na parte interna. Isso possibilita que uma carga elétrica muito grande possa ser armazenada na cúpula, levando a um potencial elétrico muito alto, suficiente para que o ar no entorno da cúpula seja ionizado e passe a se comportar como um condutor. A ionização do ar pode ser constatada pelas centelhas elétricas geradas, principalmente em terminais pontiagudos afixados à cúpula.

Ímãs

Ímãs são corpos feitos de ligas que exibem o efeito de magnetismo permanente (ex.: AlNiCo, SmCo, NdFeB, ferrite, etc.). Observa-se que ímãs possuem sempre dois pólos, sendo que pólos de tipos opostos se atraem e pólos do mesmo tipo se afastam. Nota-se ainda que alguns materiais se tornam magnetizados quando na presença de um ímã e são fortemente atraídos por ele (ditos materiais ferromagnéticos). Outros materiais podem sofrer uma atração fraca (paramagnéticos), ou mesmo serem repelidos (diamagnéticos).

Efeito Joule

Quando elétrons se movem em um condutor temos um aumento de temperatura conhecido como *efeito Joule*. O aumento da temperatura está associado a uma potência dissipada dada por

$$P = Ri^2 \quad (20.6)$$

e à capacidade térmica do condutor (produto do volume pelo calor específico do material, se ele for homogêneo).

Eletroímãs

Também é possível criar ímãs através de uma corrente elétrica. Uma maneira simples de fazer isso é enrolar sobre uma haste ferromagnética um fio condutor com uma camada isolante — garantindo que a corrente percorra toda a extensão do fio em um caminho helicoidal —. Ao fazermos passar pelo fio uma corrente, ocorre a geração de um campo magnético que induz um efeito ferromagnético na haste.

Indução de corrente em uma espira/bobina

De maneira oposta ao caso de um eletroímã, onde utilizamos uma corrente elétrica para gerar um efeito magnético, também é possível utilizar um campo magnético que varia de alguma maneira para gerar uma corrente elétrica. Uma maneira simples de verificar tal fenômeno é aproximar um ímã permanente de uma espira de fio. Ao verificarmos as extremidades da espira temos uma tensão e, caso o circuito esteja fechado, uma corrente elétrica.

Pêndulo freado por indução

Associada ao campo e corrente elétrica que ocorre no fenômeno de indução, ocorre também uma força contrária à direção do movimento. Tal força pode ser percebida em um pêndulo de material condutor: quando o pêndulo passa por uma região com um campo magnético é possível perceber uma desaceleração do pêndulo. De maneira similar, se um ímã é solto dentro de um tubo condutor vertical, a força terá o efeito de limitar a sua velocidade de queda.

Aquecimento por indução

Ainda outro fenômeno causado pela indução de corrente em um condutor é o aquecimento. Isso se deve ao efeito joule devido à resistência do condutor à corrente.

Transformadores

No caso de correntes alternadas, é possível utilizar uma bobina para gerar um campo que varia no tempo. Esse campo variável, por sua vez, pode ser utilizado para gerar um campo/corrente elétrica em uma segunda bobina. Tal princípio permite que a tensão em um circuito elétrico de corrente alternada seja alterada com relativa facilidade é a base de funcionamento de transformadores elétricos. Essa facilidade foi fundamental para que a corrente alternada fosse adotada como padrão de distribuição, pois é desejável que a tensão seja muito alta durante a transmissão e relativamente baixa durante sua utilização.

20.1.2 Medidas elétricas

A variáveis mais essenciais que podem ser medidas em circuitos elétricos são a corrente i e a tensão V , sendo que os equipamentos utilizados para determiná-las são o amperímetro e o voltímetro. Embora outras propriedades possam de uma maneira ou de outra serem determinadas a partir de informações acerca dessas duas variáveis, o uso de instrumentos combinados que possam realizar diversos tipos de medidas é bastante comum.

Uso do voltímetro

O voltímetro é um instrumento capaz de determinar a diferença de potencial elétrico (tensão) entre dois pontos quaisquer de um circuito. Para isso, basta ligar uma das pontas de prova em um dos pontos e a outra ponta no outro ponto. Devido a características construtivas de um voltímetro, é comum que ele possua diversas *escalas*, isto é, faixas de medidas (0 a 200 mV, 0 a 2 000 mV, 0 a 20 V, 0 a 200 V, etc.), sendo que a faixa mais adequada deve ser selecionada pelo usuário. Outro fator a ser considerado é se a medida deve ser feita para corrente contínua, ou para corrente alternada.

Idealmente nenhuma corrente deve fluir através do voltímetro,⁷ garantindo que o sistema se comporta durante a medida da mesma maneira que durante o seu funcionamento. Na prática, no entanto, uma pequena corrente passa através dele, o que torna necessário considerar qual é o equipamento e a escala mais indicados para cada situação.

⁷ Dizemos, portanto, que o voltímetro ideal tem resistência infinita.

Uso do amperímetro

O amperímetro tem como função determinar a corrente que passa por uma região de um circuito. Portanto, ele deve ser ligado como se fosse parte do circuito, permitindo que a corrente flua por ele e possibilitando a realização da medida. Assim como no caso do voltímetro, muitos amperímetros possuem escalas de medidas diferentes, sendo responsabilidade do usuário selecionar a mais adequada.

No caso ideal um amperímetro tem resistência nula, permitindo que a corrente flua da mesma maneira que faria caso um condutor ocupasse o lugar do aparelho. Na prática, no entanto, sempre existe uma resistência interna, embora ela seja pequena.

Atenção: não ligue o amperímetro diretamente a uma fonte de tensão! Como a resistência interna desse tipo de equipamento é muito baixa, o aparelho se comportará como um curto-circuito.

Uso do ohmímetro

A medida de resistência de um componente pode ser obtida através da razão entre a tensão aplicada a ele e a corrente obtida, porém isso implicaria em utilizar um voltímetro e um amperímetro concomitantemente. Na prática é mais simples utilizar um ohmímetro, que nos dá uma medida direta da resistência.

Atenção: O ohmímetro deverá ser utilizado diretamente no componente cuja resistência desejamos verificar. Utilizá-lo em um circuito resultará em uma medida de resistência do circuito entre os dois pontos medidos, o que poderá não corresponder à resistência do componente em que estamos realizando a medida.

Escala de cores de resistores

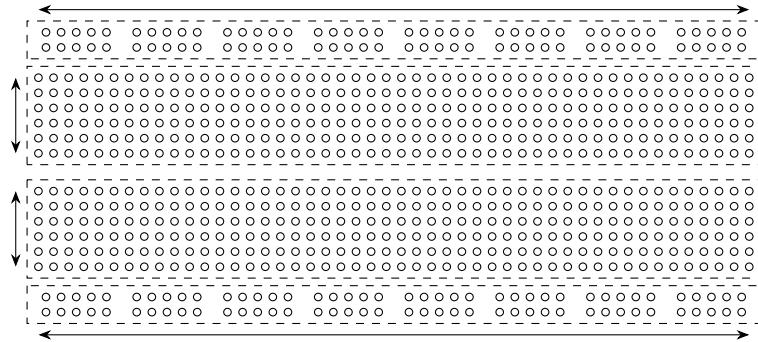
Resistores são componentes pequenos e muito abundantes em circuitos eletrônicos. Sua função é limitar a corrente em uma região do circuito de maneira a atender os requisitos do projeto elétrico/eletônico. Para descrever a resistência nominal de um resistor — isto é, a resistência declarada pelo fabricante —, é empregado um código de cores através de anéis coloridos desenhado no entorno do componente.

Protoboard

O protoboard consiste em um corpo plástico com diversos furos nos quais podem ser inseridos componentes eletrônicos. Sua função

é prover suporte mecânico para os componentes e conexões elétricas através de condutores internos. Os condutores estão organizados de maneira que os furos linhas e colunas estejam ligados entre si, por isso é necessário atenção para que os terminais dos componentes sejam ligados de maneira adequada, sem curtos-circuitos. Veja a Figura 20.3.

Figura 20.3: Imagem representativa das ligações elétricas de um protoboard. Os orifícios dos grupos das extremidades superior e inferior são ligados entre si horizontalmente, enquanto os dos grupos centrais são ligados verticalmente. Note que os grupos são independentes, isto é, não são interligados por condutores internos.



20.2 Experimento

Vamos realizar um experimento simples para nos familiarizarmos com o uso do multímetro. Verificaremos como empregá-lo para obter medidas de tensão, corrente, e resistência.

20.2.1 Objetivos

- Familiarização com o funcionamento do multímetro;
- Verificar os valores de resistência de alguns componentes;

20.3 Material Necessário

- Multímetros (2);
- Fonte de tensão regulável;
- Pilhas e resistores diversos;
- Tabela de cores de resistores;
- Protoboard;
- Cabos para ligações: banana-banana (1), banana-jacaré (2), pontas de prova (1 par).

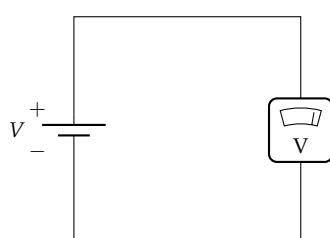


Figura 20.4: Esquema do circuito formado pela fonte de tensão e pelo multímetro ao verificarmos o valor de tensão da fonte.

20.4 Procedimento Experimental

20.4.1 Medidas de tensão

1. Tome uma pilha AA;
2. Ligue uma das pontas de prova ao terminal COM do multímetro e a outra ao terminal V;

3. Ajuste o multímetro na maior escala disponível para tensão em corrente contínua (VCC, DCV, ou V --). Anote o valor da escala na Tabela 20.1.⁸
4. Verifique a tensão da pilha e anote na Tabela 20.1 observando a quantidade adequada de algarismos significativos;
5. Refaça a medida de tensão usando as demais escalas disponíveis para tensão em corrente contínua. Caso alguma das escalas não permita fazer a leitura, marque a célula da tabela com um traço horizontal.
6. Refaça o procedimento acima para a segunda pilha/bateria e anote os resultados na Tabela 20.1.

20.4.2 Medidas de corrente e resistência

1. Ligue três resistores aleatórios em série usando o protoboard;
2. Ajuste um multímetro na menor escala da função de amperímetro e o ligue em série com os resistores. Esteja atento às marcações nas portas do multímetro: ligue um dos cabos à porta comum (COM) e o outro à porta marcada com mA;
3. Ajuste os controles da fonte regulável de forma que a tensão esteja no mínimo e a corrente no máximo;
4. Ligue o circuito formado pelos resistores e pelo amperímetro à fonte regulável;
5. Ligue a fonte e aumente a tensão até que seja lido no multímetro uma corrente de aproximadamente 5,0 mA. Anote o valor de corrente na Tabela 20.2 (note que a corrente é a mesma para os três resistores, pois eles estão ligados em série).
6. Ajuste o outro multímetro na função voltímetro. Verifique a tensão V entre os terminais de cada um dos resistores e anote na Tabela 20.2.
7. Aumente o valor de tensão da fonte regulável de forma que a corrente no circuito passe a ser de aproximadamente 10,0 mA. Anote o valor de corrente obtido na Tabela 20.2.
8. Repita as medidas de tensão entre os terminais de cada resistor e anote os valores na Tabela 20.2.
9. Finalmente, ajuste a tensão na fonte de forma a atingir uma corrente de aproximadamente 15 mA e anote o valor de corrente na Tabela 20.2.
10. Mais uma vez, repita as medidas de tensão entre os terminais de cada resistor e anote os valores na Tabela 20.2.

⁸ Tome cuidado para não colocar o multímetro em uma escala de corrente, representadas por "A".

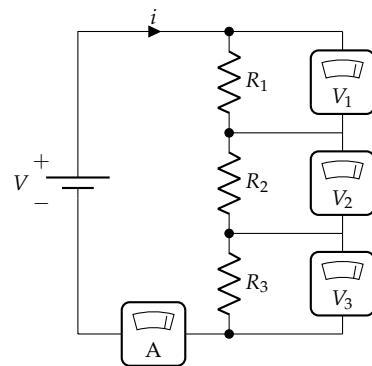


Figura 20.5: Esquema do circuito elétrico formado pela fonte de tensão e pelos três resistores.

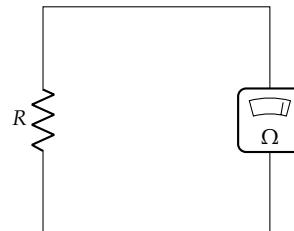


Figura 20.6: Esquema do circuito formado pelo resistor e pelo multímetro para a medição da resistência através da função ohmímetro.

11. Ajuste o multímetro na função ohmímetro, na menor escala disponível, e use os cabos banana-jacaré nas portas COM e Ω . Verifique os valores de resistência para os três resistores e anote na coluna R_m da Tabela 20.3.
12. Verifique os valores de resistência nominal R_n de cada um dos resistores e anote na Tabela 20.3.

Eletricidade e medidas elétricas

Turma: _____ Data: _____

Aluno(a): _____ Matrícula: _____

20.5 Questionário

Questão 1. (2,5 pontos) Preencha as colunas de dados experimentais das tabelas com o número adequado de algarismos significativos e unidades.

Questão 2. (2,5 pontos) Considerando os dados presentes na Tabela 20.1, qual escala é a mais adequada para determinar a tensão das pilhas/baterias?

Questão 3. (2,5 pontos) Determine o valor das resistências através da expressão

$$R = \frac{V}{i} \quad (20.7)$$

e preencha os valores R_c na Tabela 20.2.

Questão 4. (2,5 pontos) Determine os erros percentuais entre os valores de resistência calculada R_c e os valores nominais R_n .

20.6 Tabelas

Tensões em diversas escalas

Escala:

Pilha/bat. 1:

Pilha/bat. 2:

Tabela 20.1: Dados obtidos para a tensão em diversas escalas.

R_1			R_2			R_3		
V	i	R_c	V	i	R_c	V	i	R_c

Tabela 20.2: Dados para a determinação da resistência calculada R_c para os três resistores.

Tabela 20.3: Dados para a determinação do erro percentual em relação ao valor nominal.

	R_m	R_n	$\langle R_c \rangle$	$E\%$
$R_1:$				
$R_2:$				
$R_3:$				

21 Superfícies Equipotenciais

Faremos um experimentos para determinar as superfícies equipotenciais de um arranjo de dipolar cargas elétricas. Através delas, seremos capazes de determinar a direção das linhas de campo elétrico.

21.1 Potencial elétrico

O trabalho realizado por uma força \vec{F} pode ser calculado no caso mais geral através da *integral de linha*¹

$$W = \int_C \vec{F}(\vec{r}) \cdot d\vec{r}, \quad (21.1)$$

¹ Também chamada de *integral de caminho*.

onde C representa um caminho no espaço. Além disso, se a força é conservativa, podemos calcular o trabalho como o negativo da diferença de valores de uma função escalar $U(\vec{r})$ conhecida como energia potencial:

$$W = \Delta U(\vec{r}) \quad (21.2)$$

$$= U(\vec{r}_f) - U(\vec{r}_i). \quad (21.3)$$

No caso particular da força eletrostática, é conveniente denotar a força $F(\vec{r})$ como sendo o produto entre o campo elétrico e o valor q_0 da carga que se desloca e cujo trabalho estamos interessados em determinar. Assim, podemos escrever

$$\Delta U(\vec{r}) = - \int_C q_0 \cdot \vec{E}(\vec{r}) \cdot d\vec{r}. \quad (21.4)$$

Em fenômenos eletromagnéticos é bastante comum que não haja um interesse particular na quantidade de trabalho realizado em uma carga específica, mas sim na quantidade de trabalho realizada *por unidade de carga*. Dessa maneira, definimos uma nova grandeza, conhecida como *potencial elétrico*,² definida como

$$V(\vec{r}) \equiv \frac{U(\vec{r})}{q_0}. \quad (21.5)$$

² Geralmente só dizemos *potencial*, deixando o 'elétrico' subentendido.

Substituindo essa definição na expressão (21.4), obtemos

$$\Delta V(\vec{r}) = - \int_C \vec{E}(\vec{r}) \cdot d\vec{r}. \quad (21.6)$$

Definição de potencial elétrico.

O potencial elétrico $V(\vec{r})$ é um campo escalar cujo valor é de especial interesse em aplicações práticas. Devido a características dos sistemas elétricos que empregamos no dia a dia, raramente nos preocuhamos com sua dependência na posição \vec{r} e estamos simplesmente

interessados na *diferença* de potencial ΔV entre dois pontos quaisquer de um circuito elétrico. Essa diferença é o que medimos com um multímetro e denominamos como *tensão*, ou *diferença de potencial*, ou ainda *voltagem* (os três termos são equivalentes). Suas unidades são J/C ('joule por coulomb').

Note que, da mesma maneira que o trabalho está relacionado à *diferença de energia potencial* entre dois pontos, a tensão está relacionada à *diferença de potencial elétrico*, isto é, não há interesse no valor particular de potencial elétrico, mas sim na diferença de valores entre dois pontos quaisquer de um circuito.³ Quando tratamos um sistema de cargas de um ponto de vista da Física, costumamos escolher $\vec{r} = \infty$ como sendo o ponto onde o potencial é nulo. Em circuitos, é comum adotar o polo negativo de baterias como sendo o ponto de potencial nulo, ou no caso de sistemas mais complexos, o *potencial do solo* é considerado nulo: essa é a razão pela qual dizemos que há um *aterramento* de um sistema.

³ Isso é um reflexo do fato de que se o potencial é igual entre dois pontos, então a energia potencial também é, o que faz com que não haja trabalho algum realizado no deslocamento de uma carga entre as duas posições.

21.2 Potencial de uma carga pontual

O potencial de uma carga pontual pode ser calculado de maneira simples através da Equação (21.6) e da expressão para o campo elétrico gerado por ela, isto é,

$$\vec{E}(\vec{r}) = \frac{kq}{r^2}. \quad (21.7)$$

Realizando a integração para esse caso particular, obtemos

$$\Delta V(\vec{r}) = - \int_C \vec{E}(\vec{r}) \cdot d\vec{r} \quad (21.8)$$

$$= - \int_C \frac{kq}{r^2} \hat{r} \cdot d\vec{r}. \quad (21.9)$$

Como a força depende somente da distância entre as cargas, podemos tratar a integral acima como unidimensional, o que pode ser verificado matematicamente pelo produto escalar $\hat{r} \cdot d\vec{r} = dr$. Considerando um caminho que leve de um ponto $\vec{r}_A = \infty$ a um ponto qualquer $r_B = r$, temos⁴

$$\Delta V(\vec{r}) = - \int_{r_A}^{r_B} \frac{kq}{r^2} dr \quad (21.10)$$

$$V(r_B) - V(r_A) = -kq \int_{\infty}^r (r')^{-2} dr' \quad (21.11)$$

$$= kq[(r')^{-1} + C]_{\infty}^r \quad (21.12)$$

$$= \frac{kq}{r}. \quad (21.13)$$

Note que o potencial na posição $r_A = \infty$ é nulo, assim podemos escrever que o potencial elétrico devido a uma carga é dado por

$$V(r) = \frac{kq}{r}. \quad (21.14)$$

No caso uma configuração de cargas mais complexa, a visualização do potencial elétrico não é simples. Nesse caso precisamos calcular o

⁴ Estamos considerando que a carga que gera o campo se encontra na origem do sistema de coordenadas.

potencial através da Equação (21.6), porém somando sobre todas as cargas elétricas:

$$\Delta V_T(\vec{r}) = - \sum_{i=1}^N \int_C \vec{E}_i(\vec{r}_i) \cdot d\vec{r}. \quad (21.15)$$

Potencial elétrico de um conjunto de cargas.

Note que o potencial elétrico V_T devido a uma distribuição de várias cargas pode ser calculado através de uma simples soma, pois ele é definido como sendo o trabalho total realizado sobre a carga de teste devido às diferentes cargas da distribuição e *o trabalho é uma grandeza aditiva*. Alternativamente, podemos calcular o campo elétrico total $E_T(\vec{r}) = \sum_{i=1}^N$ e depois determinar o resultado da integral.

Dipolo elétrico

Para o caso de um *dipolo elétrico*, isto é, uma distribuição de cargas elétricas formada por uma carga negativa e uma positiva — ambas de mesmo valor q —, temos a soma dos potenciais de duas cargas pontuais.

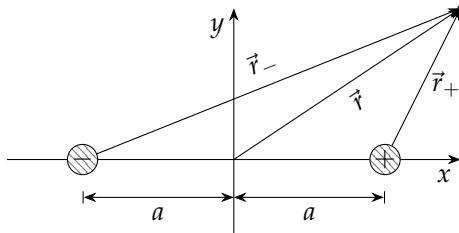


Figura 21.1: Dipolo elétrico.

Considerando que as cargas estão nas posições $-a$ e a de um eixo x cuja origem se encontra no ponto médio entre as cargas, podemos escrever o potencial como

$$V(\vec{r}) = \frac{k(-q)}{r_-} + \frac{kq}{r_+} \quad (21.16)$$

$$= kq \cdot \left(\frac{-1}{\sqrt{(r_x + a)^2 + r_y^2}} + \frac{1}{\sqrt{(r_x - a)^2 + r_y^2}} \right), \quad (21.17)$$

onde r_x e r_y são as componentes do vetor \vec{r} . Para o caso particular do potencial sobre o eixo x , é possível escrever uma expressão simples:

$$V(x) = \frac{k \cdot (-q)}{x - a} + \frac{k \cdot q}{x + a} \quad (21.18)$$

$$= -\frac{2kqa}{x^2 - a^2}. \quad (21.19)$$

21.3 Superfícies equipotenciais

Se considerarmos uma configuração qualquer de cargas, existe uma superfície contígua formada por pontos onde o potencial tem o mesmo valor. Tal superfície é o que denominamos de *superfície equipotencial*. No caso de um campo elétrico uniforme, por exemplo, o trabalho

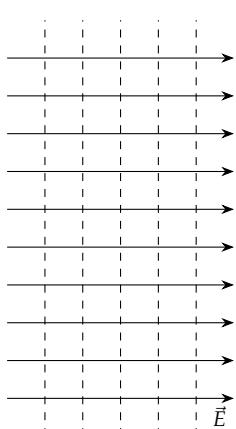


Figura 21.2: Equipotenciais no caso de um campo elétrico uniforme. Como a figura é bidimensional, as superfícies se reduzem a linhas equipotenciais.

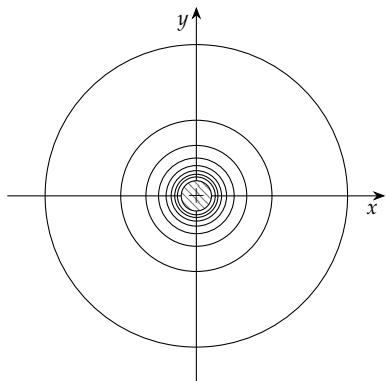


Figura 21.3: Em um plano xy as equipotenciais são linhas círculos concêntricos, no caso de uma carga pontual.

Figura 21.4: Equipotenciais de um dipolo em um plano xy que contém as cargas.

realizado sobre uma carga em um deslocamento ao longo do campo é dado por

$$\Delta V(\vec{r}) = - \int_C \vec{E}(\vec{r}) \cdot d\vec{r} \quad (21.20)$$

$$= - \int_C E \hat{i} \cdot d\vec{r} \quad (21.21)$$

$$= -E \int_{x_i}^{x_f} dx \quad (21.22)$$

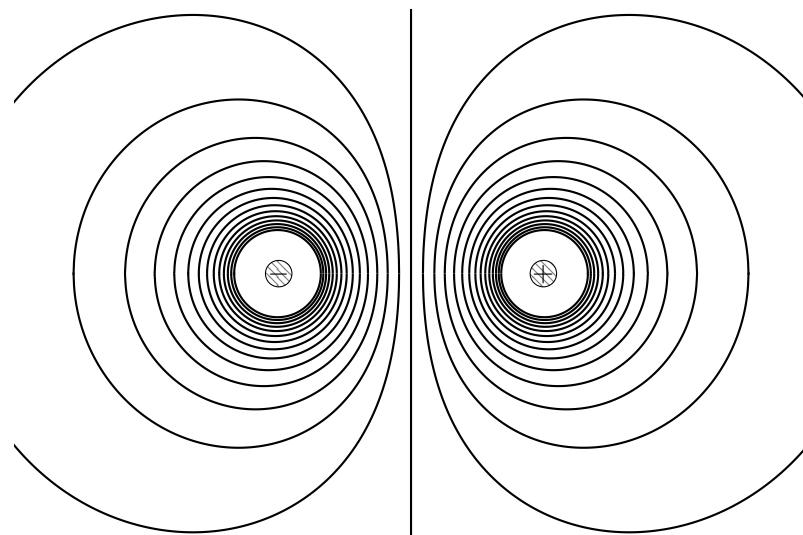
$$= -E \Delta x. \quad (21.23)$$

É possível notar através dessa expressão que o potencial é o mesmo em planos perpendiculares ao campo elétrico. Na verdade, localmente — isto é, se considerarmos uma região pequena do espaço — *a superfície equipotencial sempre será perpendicular ao campo elétrico*. Essa observação é bastante importante pois uma vez conhecida uma dessas duas grandezas, ela nos trás informação sobre a outra.

Outro caso em que as superfícies equipotenciais são relativamente simples é o de uma carga pontual: como o potencial depende somente da distância até a carga, as superfícies equipotenciais são esferas concêntricas e em cujos centros se encontra a carga elétrica em questão. Na Figura 21.3 temos a representação das equipotenciais de uma carga pontual para o caso bidimensional. Note ainda que quanto mais próximas estão as equipotenciais em uma dada região do figura, maior é a intensidade do campo elétrico.

Potencial de um dipolo

Um caso mais interessante é o das superfícies equipotenciais de um dipolo elétrico. Devido ao fato de que temos uma interação com duas cargas, uma exercendo uma força atrativa sobre a carga de teste e outra exercendo uma força negativa, temos um potencial mais complexo, onde as equipotenciais não são simples de calcular. A Figura 21.4 mostra a configuração das equipotenciais para o caso bidimensional.



21.4 Experimento

21.4.1 Objetivos

- Obter as linhas equipotenciais de um dipolo elétrico em um plano que contém as cargas;
- Obter as linhas de campo elétrico a partir das linhas de potencial elétrico;
- Obter um gráfico do potencial ao longo da linha reta que une as cargas.

21.5 Material Necessário

- Placa de Petri;
- Eletrodos com suporte;
- Becker com água;
- Papel milimetrado;
- Fonte regulável;
- Multímetro;
- Cabos para ligações: banana-jacaré (3), ponta de prova (1);

21.6 Procedimento Experimental

1. Tome duas folhas de papel milimetrado e desenhe sistemas de referência cujas origens se encontrem no centro e cujas marcas estejam distanciadas de 1,00 em 1,00 cm. Ambos os eixos devem variar de -5,00 cm a +5,00 cm;
2. Disponha a placa de Petri sobre o papel milimetrado de forma que seu centro coincida com a origem do sistema de referência;
3. Ligue os eletrodos à fonte usando os cabos fornecidos;
4. Disponha os eletrodos na placa de Petri de forma que eles estejam localizados sobre o eixo x , a uma distância de 5,00 cm da origem;
5. Ajuste o multímetro para a função de voltímetro e ligue o terminal comum ao eletrodo negativo usando o cabo fornecido;
6. Ligue a ponta de prova ao terminal marcado com V do multímetro;
7. Ajuste o multímetro para a escala de 20 V, corrente contínua ($20\text{ V }-\text{-}$).
8. Ligue a fonte regulável e a ajuste para uma tensão de 15,0 V;
9. Coloque água na placa de Petri;

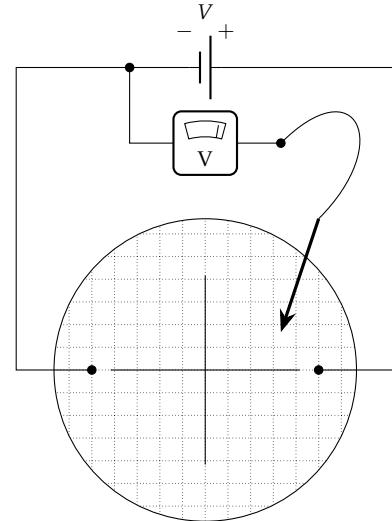
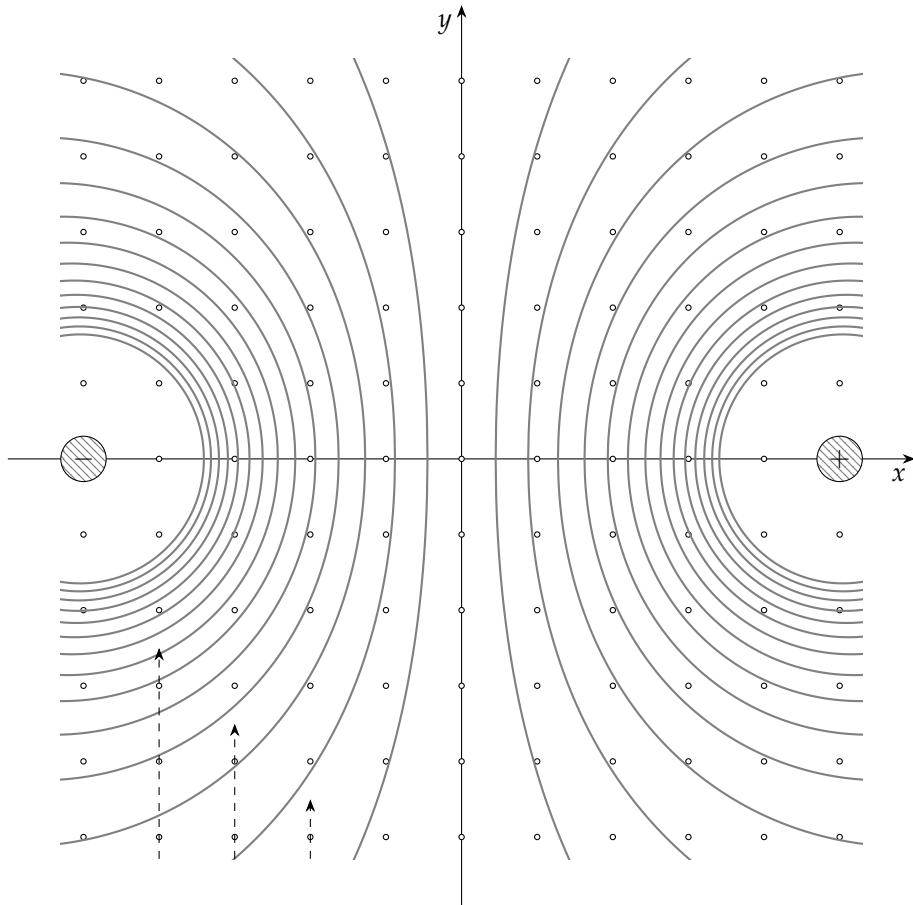


Figura 21.5: Esquema do circuito elétrico para o experimento de superfícies equipotenciais.

⁵ Tome cuidado para que a ponta de prova do multímetro,⁵ afira a tensão na origem do sistema de coordenadas e a cada 1,00 cm ao longo do eixo y (tanto para valores positivos, quanto negativos). Na outra folha de papel milimetrado, marque um ponto na posição correspondente à da medida e anote os valores de tensão ao lado dos pontos;

10. Com a ponta de prova do multímetro,⁵ afira a tensão na origem do sistema de coordenadas e a cada 1,00 cm ao longo do eixo y (tanto para valores positivos, quanto negativos). Na outra folha de papel milimetrado, marque um ponto na posição correspondente à da medida e anote os valores de tensão ao lado dos pontos;
11. Afira a tensão ao longo do eixo x desde o eletrodo negativo até o positivo a cada 1,00 cm.⁶ Anote os valores obtidos na Tabela 21.1;
12. Para a coluna $x = -4,00$ cm inicie com a ponta de prova em $y = -5,00$ cm e busque os valores de tensão dos pontos aferidos sobre o eixo x , percorrendo a coluna paralelamente ao eixo y . Note que talvez não seja possível encontrar todos os pontos;
13. Repita o procedimento do item acima varrendo todas as colunas até $x = +4,0$ cm.

Figura 21.6: Varredura da área entre os dois polos em busca das linhas equipotenciais. Inicie no canto inferior esquerdo e varra as colunas verticalmente, como mostrado na figura. Busque os valores encontrados no eixo x . Note que nem todos os valores serão encontrados na região de varredura.



Superfícies equipotenciais

Turma: _____ Data: _____

Aluno(a): _____	Matrícula: _____

21.7 Questionário

Questão 1. (2 pontos) Preencha as colunas de dados experimentais das tabelas com o número adequado de algarismos significativos e unidades.

Questão 2. (2 pontos)

- Na folha de papel milimetrado onde foram marcados os valores de potencial, ligue os pontos equipotenciais obtidos de uma maneira suave.⁷
- Considerando que as superfícies equipotenciais são sempre perpendiculares às linhas de campo elétrico, desenhe as linhas de campo de uma maneira estimada.

⁷ Estamos interessados em verificar se obtemos uma figura similar à Figura 21.6

Questão 3. (2 pontos) Faça um gráfico do potencial elétrico em função da posição x para os dados contidos na Tabela 21.1.

Questão 4. (2 pontos) Usando os dados da Tabela 21.1, estime a intensidade do campo elétrico ao longo do eixo x através de

$$|E| = \left| \frac{\partial V}{\partial x} \right| \approx \left| \frac{\Delta V}{\Delta x} \right|. \quad (21.24)$$

Faça um gráfico de $E(x)$ para o resultado obtido. Para os pontos das extremidades, use os valores de potencial dos eletrodos ao calcular o valor de ΔV .

Questão 5. (2 pontos) Considerando os objetivos do experimento, listados na Seção 21.4.1, e os resultados obtidos nas questões anteriores, discuta quais objetivos foram atingidos com sucesso, justificando suas conclusões. Se algum objetivo não foi atingido, discuta quais são os possíveis motivos do insucesso e que providências podem ser tomadas para que eles sejam alcançados.

21.8 Tabelas

Tabela 21.1: Dados para as leituras de tensão em função da posição.

22 Capacitores de placas paralelas

Vamos realizar um experimento usando um capacitor de placas paralelas cuja distância entre as placas é regulável. Isso nos permitirá observar a relação entre a capacidade e a distância, verificando a expressão teórica para a relação entre essas duas grandezas, bem como empregar um outro meio dielétrico entre as placas que não seja o ar, permitindo que determinemos sua constante dielétrica.

22.1 Capacitância

Se conectarmos uma bateria a dois condutores¹ quaisquer — dispostos um próximo ao outro, porém desconectados —, haverá um fluxo de cargas elétricas até que se estabeleça uma diferença de potencial entre os dois condutores igual à diferença de potencial entre os polos da bateria.

Dependendo de características geométricas desses dois condutores, como formato, área, e distância entre eles, a quantidade de carga necessária para estabelecer uma diferença de potencial igual à da bateria será diferente. Para uma dada configuração geométrica dos condutores, damos à razão entre a quantidade de carga Q e a diferença de potencial V correspondente o nome de *capacitância*:

$$C = \frac{Q}{V}. \quad (22.1)$$

Podemos considerar a capacidade como uma medida da quantidade de carga que um corpo condutor pode armazenar por unidade de potencial elétrico. A unidade da capacidade é o *faraud*, representado por F, sendo que

$$1 \text{ F} = 1 \text{ C/V}. \quad (22.2)$$

Ao conjunto de condutores damos o nome de *capacitor*.

22.1.1 Capacitores de placas paralelas

Se considerarmos um capacitor cujos condutores são duas placas paralelas de área A , separadas por uma distância d , podemos determinar a sua capacidade analiticamente.

Para isso, basta considerarmos que uma das placas tem carga Q e a outra tem carga $-Q$. Nesse caso, podemos dizer que a densidade superficial de carga σ é dada por

$$\sigma = \frac{Q}{A}. \quad (22.3)$$

¹ Na verdade, mesmo um só condutor também tem uma capacidade.

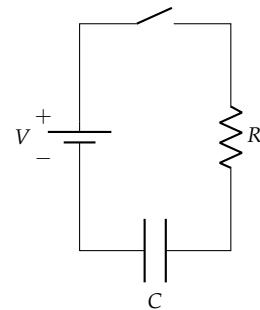


Figura 22.1: Esquema de um circuito formado por uma fonte de tensão, um interruptor, um resistor e um capacitor. Note que o símbolo para o capacitor se baseia na forma de um capacitor de placas paralelas.

Usando a Lei de Gauss, obtemos

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon_0} \quad (22.4)$$

$$= \frac{Q}{\epsilon_0 A}. \quad (22.5)$$

Como o potencial no espaço entre as placas é dado por Ed , podemos escrever

$$V = \frac{Qd}{\epsilon_0 A}. \quad (22.6)$$

Finalmente, substituindo na equação para a capacidade

$$C = \frac{Q}{V} \quad (22.7)$$

$$= \frac{Q}{Qd/(\epsilon_0 A)} \quad (22.8)$$

$$= \frac{\epsilon_0 A}{d}. \quad (22.9)$$

22.1.2 Dielétricos

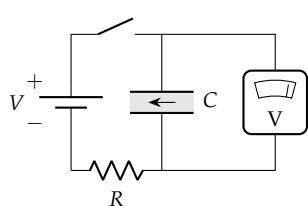
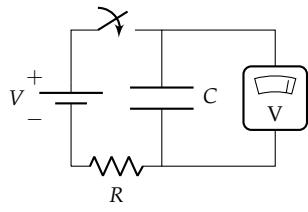


Figura 22.2: Ao desligarmos o interruptor e inserirmos um material dielétrico no capacitor observamos uma queda na diferença de potencial medida pelo voltímetro.

Vamos considerar agora a inserção de um meio não condutor qualquer entre as placas do capacitor. Se carregarmos as placas de um capacitor de placas paralelas e as conectarmos a um voltímetro ideal — isto é, um voltímetro com resistência infinita e que por isso não permite que corrente flua através dele — vamos verificar um valor de diferença de potencial dada pela relação

$$V = \frac{Q}{C}. \quad (22.10)$$

Se inserirmos o material não-condutor entre as placas, verificaremos que *ocorre uma diminuição na diferença de potencial registrada pelo voltímetro*. Se calcularmos a razão entre a tensão V_0 antes da inserção do dielétrico e a tensão V depois da inserção, obtemos

$$\kappa = \frac{V_0}{V}. \quad (22.11)$$

A constante κ é denominada como *constante dielétrica* e é característica de cada material não-condutor, sendo que $\kappa > 1$.

Calculando o novo valor de capacidade através da Equação (22.1) e usando a relação $V = V_0/\kappa$ que podemos obter da equação acima, resulta em

$$C = \frac{Q}{V} \quad (22.12)$$

$$= \frac{Q}{V_0/\kappa} \quad (22.13)$$

$$= \kappa \frac{Q}{V_0}. \quad (22.14)$$

Como não ocorre mudança na quantidade de carga armazenada nas placas ao inserirmos o dielétrico, temos que

$$Q = Q_0, \quad (22.15)$$

assim,

$$C = \kappa \frac{Q_0}{V_0} \quad (22.16)$$

$$= \kappa C_0. \quad (22.17)$$

O valor C_0 representa o valor de capacitância antes da inserção do dielétrico. Como $\kappa > 1$, verificamos que ocorre a inserção do dielétrico leva a um *aumento da capacitância*.

O aumento da capacitância pode ser entendido através de uma análise microscópica do comportamento das cargas que compõe o dielétrico: quando ele é inserido entre as placas carregadas do capacitor, as eletrosferas e núcleos atômicos sofrem um pequeno deslocamento no sentido de se aproximar das placas carregadas positiva e negativamente, respectivamente. Isso dá origem a um campo elétrico devido ao próprio dielétrico e que tem sentido oposto ao campo gerado pelas placas do capacitor — denominamos esse fenômeno como uma *polarização* do dielétrico —. Portanto, o campo elétrico do dielétrico polarizado “compensa” parcialmente o campo gerado pelas placas do capacitor, o que diminui o campo elétrico total e, consequentemente, a diferença de potencial entre as placas.²

É importante notar que na discussão para definir a capacitância não consideramos a existência do ar como um meio polarizável. Na verdade, o ar é um dielétrico que sofre uma polarização como outro qualquer, portanto existe um valor de κ_{ar} que relaciona a capacitância C_{ar} de um capacitor quando há ar entre as suas placas, com o seu valor de capacitância no vácuo. No entanto, o valor de κ_{ar} é muito próximo de 1 e podemos desprezar os efeitos do ar como um meio dielétrico na maior parte dos casos.

22.2 Experimento

22.2.1 Objetivos

- Observar a relação entre a capacitância e a distância entre as placas condutoras;
- Determinar a constante dielétrica do material inserido entre as placas;

22.3 Material Necessário

- Capacitor de placas paralelas móveis;
- Multímetro;
- Lâmina dielétricas;
- Micrômetro e paquímetro;
- Cabos para ligações: banana-jacaré (2).

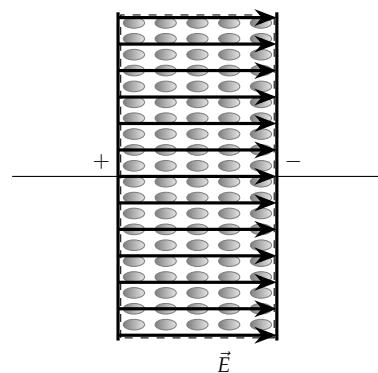


Figura 22.3: O campo elétrico devido às placas do capacitor polarizam o dielétrico. Tal polarização geram um campo elétrico no material que faz com que o campo total seja diminuído.

² A combinação do campo elétrico devido às placas do capacitor e devido à polarização do dielétrico é conhecido como *deslocamento elétrico*.

22.4 Procedimento Experimental

1. Utilizando um paquímetro, verifique as dimensões das placas do capacitor;
2. Ajuste o multímetro para a escala de 20 nF da função de medição de capacitância (essa função está marcada com o símbolo de capacitor mostrado na Figura 22.4.)
3. Ligue cada uma das placas do capacitor aos terminais do multímetro (terminal COM e aquele que tem o símbolo de capacitor mostrado na Figura 22.4).
4. Utilizando um micrômetro, meça a espessura de uma lâmina dielétrica e a coloque entre as placas do capacitor de forma que que não reste ar entre as placas e a lâmina.³ Anote o valor obtido na Tabela 22.1;
5. Afira o valor de capacitância e o anote na Tabela 22.1;
6. Tomando cuidado para não mover as placas do capacitor, remova a lâmina dielétrica e afira o novo valor de capacitância e o anote na Tabela 22.1
7. Repita os passos acima a partir do item 4, adicionando mais uma folha de dilétrico e anotando na Tabela 22.1 os valores de *distância total* entre as placas e as capacitâncias com e sem as lâminas dielétricas.

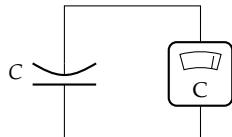


Figura 22.4: Capacitor ligado ao multímetro na função de medição de capacitância. O símbolo mostrado para o capacitor é o de um capacitor polarizado, isto é, que tem polaridades definidas para os terminais. O terminal positivo é representado pela linha reta, enquanto a linha curva representa o terminal negativo.

³ Tomem cuidado para não pressionar muito as folhas dielétricas, pois isso deixará a placa deslizante do capacitor tensionada, o que vai fazer com que a placa se desloque ao retirarmos as lâminas dielétricas. Como estamos interessados em determinar as capacitâncias para *uma mesma distância*, a separação entre as placas deve permanecer a mesma.

Capacitores de placas paralelas

Turma: _____ Data: _____

Aluno(a): _____	Matrícula: _____

22.5 Questionário

Questão 1. (2 pontos) Preencha as colunas de dados experimentais das tabelas com o número adequado de algarismos significativos e unidades.

Questão 2. (3 pontos) Considerando os dados de capacitância quando há somente ar entre as placas do capacitor,

- i. Faça um gráfico do valor de capacitância em função da distância de separação entre as placas.
- ii. Faça um ajuste de uma curva do tipo $y = A + B \cdot x^{-1}$ para os dados obtidos.⁴
- iii. Determine o valor da permissividade do vácuo ϵ_0 através dos valores dos coeficientes A e B calculados.
- iv. Considerando o valor obtido no item anterior, calcule o erro percentual em relação ao valor de referência para ϵ_0 .

⁴ Nem todo software é capaz de realizar esse tipo de ajuste, porém as calculadoras geralmente têm suporte a esse procedimento. Alternativamente, vocês podem fazer uma linearização dos dados e realizar uma regressão linear.

Questão 3. (3 pontos) Considerando os dados de capacitância quando as placas do capacitor estão separadas pelas *lâminas dielétricas*,

- i. Faça um gráfico do valor de capacitância em função da distância de separação entre as placas.
- ii. Faça um ajuste de uma curva do tipo $y = A + B \cdot x^{-1}$ para os dados obtidos.⁵
- iii. Através dos coeficientes A e B obtidos no item anterior, determine o valor da constante dielétrica κ para o material utilizado.

⁵ Novamente, pode ser necessário fazer uma linearização dos dados e realizar uma regressão linear, caso o software utilizado não tenha suporte a ajustes do tipo $y = A + B \cdot x^{-1}$.

Questão 4. (2 pontos) Considerando os objetivos do experimento, listados na Seção 22.2.1, e os resultados obtidos nas questões anteriores, discuta quais objetivos foram atingidos com sucesso, justificando suas conclusões. Se algum objetivo não foi atingido, discuta quais são os possíveis motivos do insucesso e que providências podem ser tomadas para que eles sejam alcançados.

22.6 *Tabelas*

Dimensões		
Diâmetro:		
Dados experimentais		
C	C_0	d

Tabela 22.1: Dados para a capacidade com e sem dielétrico.

23 Lei de Ohm

Faremos um experimento simples onde verificaremos a corrente em função da tensão para dois tipos de resistores, um ôhmico e outro não-ôhmico. Buscaremos observar que a resistência pode ser ou não uma constante, dependendo do material em questão. Veremos um modelo físico para materiais condutores e para a resistência, obtendo uma expressão para a velocidade de deriva dos elétrons. Definiremos a densidade de corrente J e sua relação com o campo elétrico em um condutor e consequente classificação dos condutores como ôhmicos e não-ôhmicos. Definiremos também os conceitos de resistividade e condutibilidade. Para analisar os dados obtidos, usaremos gráficos e regressões lineares.

23.1 Modelo microscópico para a corrente elétrica

Microscopicamente, a corrente elétrica nada mais é do que o deslocamento de portadores de carga — geralmente elétrons livres, mas podendo ser íons positivos ou mesmo, no caso de semicondutores, “buracos” onde não há um elétron —. Quando não há corrente, podemos considerar que os portadores de carga se comportam de uma maneira similar a um gás, movendo-se aleatoriamente devido a colisões com a rede de átomos que compõe o condutor.

Quando o condutor é sujeito a um campo elétrico, as cargas se deslocam de maneira a neutralizá-lo, porém se ele se deve à diferença de potencial elétrico dos polos de uma bateria, por exemplo, o campo nunca é neutralizado e a corrente se mantém fluindo. Esse fluxo de portadores de corrente não é livre, mas ainda está sujeito às sucessivas colisões com os átomos que compõe o condutor. No entanto, devido ao campo elétrico e à consequente força que atua sobre as cargas, o movimento tem uma direção na qual as cargas são aceleradas até uma eventual nova colisão. Devido às colisões, a velocidade não aumenta indefinidamente, mas atinge um valor denominado *velocidade de deriva*. Uma consequência notável dessas colisões é o *efeito joule*, isto é, o aquecimento característico de um condutor sujeito a uma corrente.

A velocidade de deriva pode ser calculada ao considerarmos uma seção cilíndrica com área de seção reta A e comprimento ℓ de um condutor portanto corrente. A quantidade total de carga Q contida nesse segmento é dada por

$$Q = nA\ell q, \quad (23.1)$$

onde n é a densidade de portadores por unidade de volume e q é a carga de cada portador. Se considerarmos que os portadores se movem com velocidade v_d , então em um tempo Δt eles se deslocam uma distância $\ell = v_d\Delta t$. Assim, podemos escrever

$$Q = nAv_d\Delta t q. \quad (23.2)$$

Dividindo ambos os lados da equação por Δt , obtemos a corrente média no condutor:

$$\langle i \rangle = \frac{Q}{\Delta t} = nqv_d A, \quad (23.3)$$

De onde podemos escrever, fazendo $\langle i \rangle = i = \text{cte}$

$$v_d = \frac{i}{nqA}. \quad (23.4)$$

Note que a velocidade de deriva não é constante, mas depende do valor de corrente e do material condutor utilizado, uma vez que a densidade de portadores de corrente n é diferente para cada material.

23.1.1 Condutores, resistividade, e resistência

Podemos definir a densidade de corrente J como sendo a razão entre a corrente e a área de seção reta do condutor

$$J = \frac{i}{A}, \quad (23.5)$$

¹ Note que essa definição para a densidade de corrente assume que ela é uniforme em toda a área A .

ou, em termos da densidade de portadores e da velocidade de deriva,¹

$$J = nqv_d. \quad (23.6)$$

Para alguns materiais, a relação entre a densidade de corrente J e o campo elétrico E dentro do condutor pode ser descrita de acordo com

$$J = \sigma E, \quad (23.7)$$

onde σ representa a *condutividade* do material. Caso o condutor obedeca a essa relação, dizemos que ele é um *condutor ôhmico*. Caso contrário, dizemos que ele é um *condutor não ôhmico*.

Podemos obter uma relação mais prática se observarmos que para um segmento de um material condutor com área de seção reta A e comprimento ℓ a diferença de potencial entre suas extremidades pode ser escrita como

$$\Delta V = E\ell. \quad (23.8)$$

Logo, a densidade de corrente pode ser escrita como

$$J = \sigma E \quad (23.9)$$

$$= \sigma \frac{\Delta V}{\ell}. \quad (23.10)$$

Isolando ΔV e substituindo $J = i/A$, obtemos

$$\Delta V = \left(\frac{\ell}{\sigma A} \right) i. \quad (23.11)$$

A quantidade entre parêntesis na equação acima é o que denominamos como *resistência* do segmento de material condutor:

$$R = \frac{\ell}{\sigma A}. \quad (23.12)$$

Em circuitos eletrônicos, é comum que se usem componentes denominados como *resistores* e que são feitos de um material com baixa

condutibilidade, como grafite, algumas cerâmicas, ou óxidos metálicos. Considerando a resistência R , podemos escrever a relação

$$R = \frac{\Delta V}{i}, \quad (23.13)$$

que é comumente empregada quando tratamos um sistema que inclui um resistor.

Note que no caso de materiais ôhmicos, o valor de condutividade é constante. Consequentemente, a resistência R de um resistor feito de um material ôhmico também é constante e denominamos tal componente como um *resistor ôhmico*. Podemos identificar um resistor desse tipo facilmente, bastando verificar se a relação entre a corrente que passa por ele e a tensão a que ele é submetido é linear.

Finalmente, é interessante notar que o inverso da condutibilidade é denominado como *resistividade* ρ :

$$\rho \equiv \frac{1}{\sigma}. \quad (23.14)$$

Em termos da resistividade, temos que a resistência é dada por

$$R = \frac{\rho \ell}{A}. \quad (23.15)$$

Essa grandeza pode ser mais conveniente para a análise da resistência de um material longo, como um fio, uma vez que podemos estar interessados em conhecer a resistência por unidade de comprimento.

Nesse caso,

$$\frac{R}{\ell} = \frac{\rho}{A}. \quad (23.16)$$

23.2 Experimento

23.2.1 Objetivos

- Verificar a relação linear entre tensão e corrente para resistores ôhmicos;
- Determinar a resistência de um resistor ôhmico através de uma regressão linear;
- Verificar a relação entre tensão e corrente para resistores não ôhmicos;
- Observar a relação entre resistência e corrente, assim como a relação entre a resistência e a tensão, buscando determinar se há ou não algum padrão claro de comportamento;

23.3 Material Necessário

- Fonte de tensão regulável;
- Multímetro;
- Resistores de 20 W;
- Lâmpadas incandescentes e soquetes;
- Cabos para ligações: banana-banana (1), banana-jacaré (2);

23.4 Procedimento Experimental

23.4.1 Resistores ôhmicos e não-ôhmicos

Coleta de dados para um resistor:

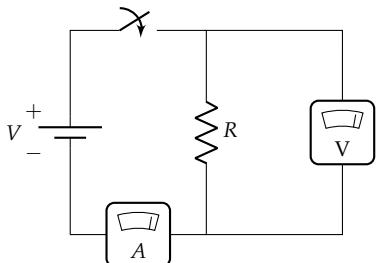


Figura 23.1: Circuito para a verificação do comportamento de um resistor ôhmico.

1. Ajuste a fonte de tensão regulável em seu valor mínimo de tensão e máximo de corrente;
2. Ajuste o multímetro na função de amperímetro, na escala de 200 mA;
3. Ligue um dos terminais da fonte ao multímetro, na porta marcada como COM;
4. Conecte um cabo ao terminal do multímetro marcado como mA e o ligue a um resistor;
5. Ligue o outro terminal da fonte ao resistor;
6. Ligue a fonte e ajuste a tensão para aproximadamente 1,0 V e anote o valor na Tabela 23.1;
7. Verifique o valor correspondente de corrente e o anote na Tabela 23.1;
8. Calcule o valor de potência dissipada e o anote na Tabela 23.1.
Atenção: o valor de potência não deve exceder 0,5 W durante toda a tomada de dados, caso contrário, o componente poderá ficar muito quente e causar queimaduras e/ou ser danificado;
9. Aumente o valor de tensão da fonte regulável em aproximadamente 1,0 V e repita os passos acima, completando a Tabela 23.1 até 10 V, ou até que a potência exceda 0,5 W.

Coleta de dados para uma lâmpada incandescente:

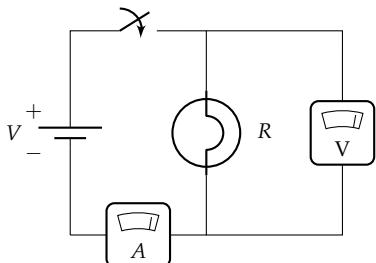


Figura 23.2: Circuito para a verificação do comportamento de um resistor não-ôhmico.

1. Ajuste a fonte de tensão regulável em seu valor mínimo de tensão e máximo de corrente;
2. Ajuste o multímetro na função de amperímetro, na escala de 20 A;
3. Ligue um dos terminais da fonte ao multímetro, na porta marcada como COM;
4. Conecte um cabo ao terminal do multímetro marcado como 20A e o ligue aos cabos do soquete da lâmpada;
5. Ligue o outro terminal da fonte ao resistor;
6. Ligue a fonte e ajuste a tensão para aproximadamente 2,0 V e anote o valor na Tabela 23.1;
7. Verifique o valor correspondente de corrente e o anote na Tabela 23.1;
8. Calcule o valor de potência dissipada e o anote na Tabela 23.1;

9. Aumente o valor de tensão da fonte regulável em aproximadamente 1,0 V e repita os passos acima, completando a Tabela 23.1 até 15 V.

Lei de Ohm

Turma: _____ Data: _____

Aluno(a): _____	Matrícula: _____

23.5 Questionário

Questão 1. (2 pontos) Preencha as colunas de dados experimentais das tabelas com o número adequado de algarismos significativos e unidades.

Questão 2. (3 pontos)

- i. Faça um gráfico para os dados de corrente i em função da tensão V para o resistor.
- ii. Realize uma regressão linear dos dados experimentais contidos no gráfico.
- iii. Através dos coeficientes da regressão linear, determine a resistência.

Questão 3. (2,5 pontos) Considerando os dados obtidos para a lâmpada incandescente, elabore os seguintes gráficos:

- i. Um gráfico para os dados de corrente i em função da tensão V .
- ii. Um gráfico para os dados de resistência R em função da tensão V .
- iii. Um gráfico para os dados de resistência R em função da corrente i .

Questão 4. (2,5 pontos) Considerando os objetivos do experimento, listados na Seção 23.2.1, e os resultados obtidos nas questões anteriores, discuta quais objetivos foram atingidos com sucesso, justificando suas conclusões. Se algum objetivo não foi atingido, discuta quais são os possíveis motivos do insucesso e que providências podem ser tomadas para que eles sejam alcançados.

23.6 Tabelas

Resistor			Lâmpada		
<i>V</i>	<i>i</i>	<i>P</i>	<i>V</i>	<i>i</i>	$R = V/i$

Tabela 23.1: Dados obtidos para o comprimento do elástico e a massa correspondente.

24 Circuito RC

Realizaremos um experimento de carregamento e descarregamento de um capacitor com o objetivo de observar o comportamento de um sistema onde a corrente não é constante.

24.1 Circuito RC

Os circuitos formados por uma fonte de tensão, um resistor, e um capacitor, ou por um resistor e um capacitor carregado, são os exemplos mais simples de circuitos onde a corrente não é constante. Verificaremos abaixo como determinar a carga do capacitor em cada uma dessas situações como funções do tempo.

24.1.1 Cargarregamento de um capacitor

Podemos determinar a corrente como uma função do tempo para o primeiro caso considerando que o capacitor está inicialmente descarregado e aplicando a lei de Kirchhoff ao circuito mostrado na Figura 24.1:

$$V_b - \frac{q}{C} - iR = 0, \quad (24.1)$$

onde V_b representa a tensão da bateria, R a resistência do resistor, q a carga contida no capacitor, C a capacitância do capacitor, e i representa a corrente que flui no circuito.

Como

$$i = \frac{dq}{dt}, \quad (24.2)$$

podemos escrever

$$V_b - \frac{q}{C} - R \frac{dq}{dt} = 0. \quad (24.3)$$

Equações como essa são o que denominamos como *equações diferenciais ordinárias*. Suas soluções não são valores numéricos específicos, mas sim *funções* da variável em relação a qual está sendo realizada a derivada. Assim como para as integrais, não existe um método único para solucioná-las e cada classe de equações exigirá caminhos diferentes.

No caso específico da equação acima, a solução consiste em encontrar uma função $q(t)$ para a carga do capacitor como função do tempo. O método de solução é um dos mais simples dentre os diversos empregados para resolver equações diferenciais e consiste em

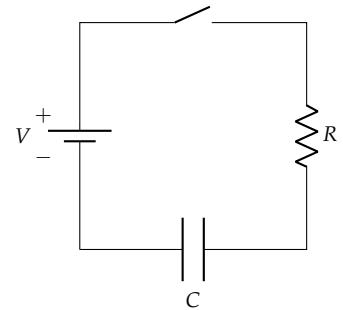


Figura 24.1: Circuito RC para a análise do processo de carregamento do capacitor.

uma integração. Reordenando os termos, obtemos

$$\frac{dq}{dt} = \frac{V_b}{R} - \frac{q}{RC} \quad (24.4)$$

$$= \frac{V_b C - q}{RC} \quad (24.5)$$

$$= -\frac{q - V_b C}{RC} \quad (24.6)$$

Reescrevendo a equação acima e integrando o lado esquerdo entre o valor inicial de carga $q_i = 0$ e o valor final $q_f = q$ e o lado direito entre o valor inicial de tempo $t_i = 0$ e o valor final $t_f = t$ obtemos:

$$\frac{dq}{q - V_b C} = -\frac{1}{RC} dt \quad (24.7)$$

$$\int_0^q \frac{dq}{q - V_b C} = -\frac{1}{RC} \int_0^t dt. \quad (24.8)$$

Para solucionarmos a integral do lado esquerdo, precisamos fazer a mudança de variáveis

$$q' = q - V_b C, \quad (24.9)$$

o que implica em

$$\frac{dq'}{dq} = \frac{d}{dq}(q - V_b C) \quad (24.10)$$

$$= 1, \quad (24.11)$$

ou seja,

$$dq' = dq. \quad (24.12)$$

Consequentemente,

$$\int \frac{dq}{q - V_b C} = \int \frac{dq'}{q'}. \quad (24.13)$$

Realizando as integrações, obtemos

$$\int \frac{dq'}{q'} = -\frac{1}{RC} \cdot [t + \alpha_1]_0^t \quad (24.14)$$

$$\ln(q') + \alpha_2 = -\frac{1}{RC} \cdot t, \quad (24.15)$$

onde α_1 e α_2 representam as constantes características da integração indefinida. Substituindo a variável q' pela expressão original e substituindo os limites de integração originais, a expressão acima se torna

$$[\ln(q - V_b C) + \alpha]_0^q = -\frac{t}{RC} \quad (24.16)$$

$$\ln\left(\frac{q - V_b C}{-V_b C}\right) = -\frac{t}{RC}, \quad (24.17)$$

onde usamos a propriedade $\ln a - \ln b = \ln a/b$.

Finalmente, para que possamos expressar a carga do capacitor como uma função do tempo $q(t)$, basta tomarmos a exponencial de

ambos os lados, o que resulta em

$$\frac{q - V_b C}{-V_b C} = \exp\left(-\frac{t}{RC}\right) \quad (24.18)$$

$$q - V_b C = -V_b C \exp\left(-\frac{t}{RC}\right) \quad (24.19)$$

$$q = V_b C - V_b C \exp\left(-\frac{t}{RC}\right) \quad (24.20)$$

$$q(t) = V_b C \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{RC}\right)\right]. \quad (24.21)$$

Embora a determinação da função $q(t)$ seja a solução da Equação (24.1), não temos meios de determinar a carga de um capacitor experimentalmente de uma maneira direta. No entanto, a tensão em um capacitor — que é uma variável que pode ser medida facilmente com o uso de um voltímetro — está relacionada à sua carga através de

$$V_C = \frac{q}{C}. \quad (24.22)$$

Se dividirmos a expressão para $q(t)$ por C de ambos os lados da equação, obtemos

$$V_C(t) = V_b \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{RC}\right)\right]. \quad (24.23)$$

Fazendo um gráfico da expressão acima, obtemos a Figura 24.2. Note que no processo de carregamento a tensão registrada no capacitor tende à tensão V_b da bateria.

24.2 Descarregamento de um capacitor

Para o processo de descarregamento do capacitor ao aplicarmos a lei de Kirchhoff temos que

$$-\frac{q}{C} - iR = 0. \quad (24.24)$$

Novamente, usando $i = dq/dt$, e reorganizando os termos obtemos

$$R \frac{dq}{dt} + \frac{q}{C} = 0 \quad (24.25)$$

$$\frac{dq}{dt} + \frac{q}{RC} = 0 \quad (24.26)$$

$$\frac{dq}{dt} = -\frac{q}{RC} \quad (24.27)$$

$$\frac{dq}{q} = -\frac{dt}{RC}. \quad (24.28)$$

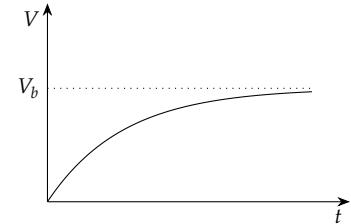


Figura 24.2: Gráfico da tensão como função do tempo registrada no capacitor durante o processo de carregamento.

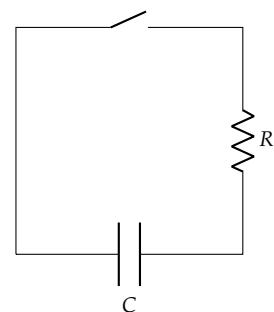


Figura 24.3: Circuito RC para a análise do processo de descarregamento do capacitor.

Integrando ambos os lados da equação acima, temos

$$\int_{q_i}^{q_f} \frac{dq}{q} = -\frac{1}{RC} \int_{t_i}^{t_f} dt \quad (24.29)$$

$$[\ln q + \alpha_1]_{q_i}^{q_f} = -\frac{q}{RC} [t + \alpha_2]_{t_i}^{t_f} \quad (24.30)$$

$$\ln \frac{q_f}{q_i} = -\frac{\Delta t}{RC} \quad (24.31)$$

$$\frac{q_f}{q_i} = \exp \left(-\frac{\Delta t}{RC} \right) \quad (24.32)$$

$$q_f = q_i \exp \left(-\frac{\Delta t}{RC} \right). \quad (24.33)$$

Se fizermos $t_i = 0$, $t_f = t$, e $q_i = q_0$, podemos representar a carga como uma função do tempo através de

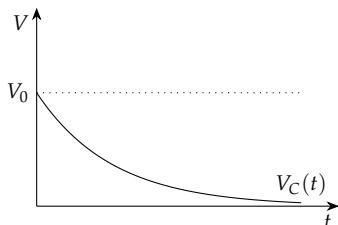


Figura 24.4: Gráfico da tensão como função do tempo registrada no capacitor durante o processo de descarregamento.

Novamente, se dividirmos ambos os lados da equação por C , obtemos a tensão no capacitor:

$$V_C(t) = V_0 \exp \left(-\frac{t}{RC} \right).$$

24.2.1 Objetivos

- Verificar a validade da expressão para a tensão durante o carregamento do capacitor;
- Verificar a validade da expressão para a tensão durante o descarregamento do capacitor;
- Determinar o valor do produto da resistência e capacitância do circuito, isto é, o valor de RC , a partir dos dados experimentais;

24.3 Material Necessário

- Fonte de tensão regulável;
- Multímetro;
- Protoboard;
- Resistores;
- Capacitores eletrolíticos;
- Tabela de cores de resistores;
- Cronômetro;
- Cabos para ligações: banana-jacaré (4);

24.4 Procedimento Experimental

24.4.1 Carregamento de um capacitor

Atenção: Não ligue a fonte de tensão ao circuito antes de se certificar que as ligações estejam corretas, pois há risco de o capacitor ser danificado, entrar em combustão, e mesmo explodir.¹ Verifique o valor máximo de tensão que o capacitor suporta e nunca exceda esse valor.

1. Conecte o capacitor ao protoboard;
2. **Atenção:** Note que o capacitor eletrolítico tem seus terminais marcados como '+' e '−', ou pelo menos um dos terminais é marcado. Conecte um ou mais resistores em série ao protoboard de maneira que um dos terminais esteja na mesma linha condutora que o terminal *negativo*² do capacitor;
3. Anote o valor total de resistência na Tabela 24.1, na seção de valores nominais.
4. Use os cabos banana-jacaré para ligar o multímetro aos terminais do capacitor (iremos medir valores de tensão em corrente contínua);
5. **Atenção:** Vamos preparar a ligação do circuito à fonte. Como estamos usando um capacitor eletrolítico, não podemos ligá-lo com as polaridades invertidas, pois isso fará com que o componente seja destruído.
 - (a) Ligue um cabo banana-jacaré do terminal negativo da fonte ao terminal livre do resistor;
 - (b) Ligue um cabo banana-jacaré ao terminal positivo do capacitor, deixando a outra extremidade desconectada. Adiante ela será ligada ao terminal positivo da fonte.
6. Ligue a fonte. Ajuste os limitadores de corrente para os seus valores máximos e ajuste a tensão para um valor de 5,0 V;
7. Ajuste o multímetro na função voltímetro de corrente contínua, escolhendo uma escala que permita medir o valor de tensão ajustado na fonte regulável.
8. Zere o cronômetro;
9. Na primeira linha da Tabela 24.1, na seção de carregamento, anote o valor de tempo de 0 s e o valor correspondente de tensão de 0 V;
10. Prepare-se para anotar os valores de tempo e de tensão a cada 15,0 s;
11. Início do processo de carregamento.³
 - (a) Ao mesmo tempo que a extremidade livre do cabo banana-jacaré ligado ao terminal positivo do capacitor é conectado ao terminal positivo da fonte, acione o cronômetro.

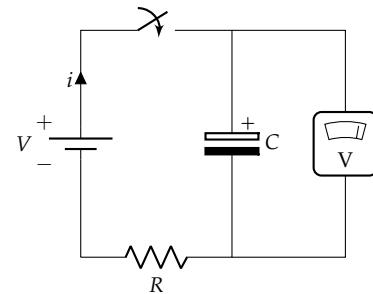


Figura 24.5: Carga de um capacitor eletrolítico.

¹ Provavelmente o risco de ferimentos é menor do que o de se queimar no experimento de dilatação térmica, mas mesmo assim, tomem cuidado.

² Tanto faz, na verdade, mas nos próximos passos eu vou assumir que ele esteja ligado ao terminal negativo.

³ Os valores de tempo sugeridos foram calculados com base em um valor de RC de aproximadamente 140 s.

- (b) Quando o cronômetro atingir 15,0 s, registre o valor de tempo t registrado pelo cronômetro e o valor de tensão V_C registrado pelo multímetro na Tabela 24.1;
- (c) Continue anotando os valores de t e V_C a cada 15,0 s, anotando-os na tabela, interrompendo as medidas após 300 s.
- (d) A finalizar o carregamento, remova os cabos dos terminais do resistor e do capacitor. Tome cuidado para que nenhum condutor toque o circuito pois vamos utilizar o capacitor carregado no processo de descarga na seção seguinte.
- (e) Desconecte os cabos da fonte e a desligue.

24.4.2 Descarregamento de um capacitor

Ao final do procedimento da seção anterior, o capacitor estará carregado, ainda que parcialmente. Vamos agora realizar o descarregamento.

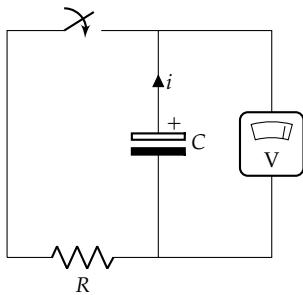


Figura 24.6: Descarga de um capacitor eletrolítico.

⁴ Como o multímetro não é ideal, a tensão do capacitor sempre estará diminuindo, uma vez que existe uma pequena corrente. Procure não demorar para iniciar o processo de descarga após verificar o valor inicial de tensão.

1. Zere o cronômetro;
2. Conecte um cabo jacaré-jacaré ao terminal do resistor;
3. Na primeira linha da Tabela 24.1, na seção de descarregamento, anote o valor de tempo de 0 s e o valor correspondente de tensão lido no multímetro;⁴
4. Prepare-se para anotar os valores de tempo e de tensão a cada 15 s;
5. Início do processo de descarregamento:
 - (a) Ao mesmo tempo que a extremidade livre do cabo é ligada ao terminal positivo do capacitor, acione o cronômetro;
 - (b) Quando o cronômetro atingir 15 s, registre o valor de tempo t registrado pelo cronômetro e o valor de tensão V_C registrado pelo multímetro na Tabela 24.1;
 - (c) Continue anotando os valores de t e V_C a cada 15 s, anotando-os na tabela, interrompendo as medidas após 300 s.

Circuito RC

Turma: _____ Data: _____

Aluno(a): _____	Matrícula: _____

24.5 Questionário

Questão 1. (2 pontos) Preencha as colunas de dados experimentais das tabelas com o número adequado de algarismos significativos e unidades.

Questão 2. (3 pontos) Para o carregamento do capacitor:

- i. Elabore um gráfico de tensão em função do tempo para o capacitor.
- ii. Faça um ajuste dos dados experimentais e obtenha o valor do produto RC . Você pode optar por fazer algum tipo de mudança de variáveis, se necessário. Nesse caso, faça um gráfico mostrando o resultado considerando a mudança de variáveis adotada.

Questão 3. (3 pontos) Para o descarregamento do capacitor:

- i. Elabore um gráfico de tensão em função do tempo para o capacitor.
- ii. Faça um ajuste dos dados experimentais e obtenha o valor do produto RC . Você pode optar por fazer algum tipo de mudança de variáveis, se necessário. Nesse caso, faça um gráfico mostrando o resultado considerando a mudança de variáveis adotada.

Questão 4. (2 pontos) Considerando os objetivos do experimento, listados na Seção 24.2.1, e os resultados obtidos nas questões anteriores, discuta quais objetivos foram atingidos com sucesso, justificando suas conclusões. Se algum objetivo não foi atingido, discuta quais são os possíveis motivos do insucesso e que providências podem ser tomadas para que eles sejam alcançados.

24.6 Tabelas

Valores nominais		
R		
C		
V_b		
Carregamento		
t	V_C	
Descarregamento		
t	V_C	

Tabela 24.1: Dados obtidos para o carregamento e descarregamento do capacitor.

25 Campo magnético terrestre

Vamos utilizar as bobinas de Helmholtz para gerar um campo magnético perpendicular ao campo magnético da Terra, possibilitando que determinemos a intensidade da componente horizontal deste último. Vamos calcular a intensidade do campo gerado por uma espira circular portando corrente e estender esse resultado para determinar o campo gerado pelas bobinas de Helmholtz. Finalmente, vamos usar uma linearização e uma regressão linear para determinar o resultado para a intensidade do campo magnético terrestre.

25.1 Campo magnético devido a uma espira

Podemos determinar o campo magnético de uma espira circular ao longo do eixo z que passa por seu centro, perpendicularmente ao plano que contém a espira, através da lei de Biot-Savart:

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I d\vec{\ell} \times \hat{r}}{r^2}. \quad (25.1)$$

No caso particular da espira circular, a equação acima descreve o campo $d\vec{B}$ gerado por um segmento de comprimento $d\vec{\ell}$ do condutor que porta uma corrente I .

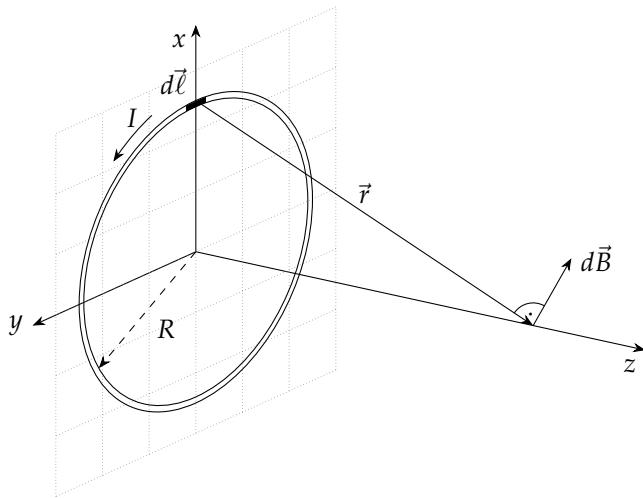


Figura 25.1: Campo $d\vec{B}$ devido à corrente I no segmento $d\vec{\ell}$ da espira.

Note que devido à simetria rotacional do problema, verificamos que sobre o eixo z as componentes B_x e B_y do campo magnético são nulas, restando somente a componente B_z . Por essa razão, vamos nos preocupar somente com a determinação de dB_z de agora em diante. Esta componente pode ser determinada ao projetarmos o campo dB na direção do eixo z através de

$$dB_z = dB \sin \theta. \quad (25.2)$$

Podemos determinar o módulo do campo magnético ao tomarmos a lei de Biot-Savart em módulo:

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I |d\vec{\ell} \times \hat{r}|}{r^2}. \quad (25.3)$$

Como $d\vec{\ell} \perp \hat{r}$, o módulo do produto vetorial entre esses dois vetores resulta em

$$|d\vec{\ell} \times \hat{r}| = d\ell. \quad (25.4)$$

Além disso, ainda que a distância r entre o ponto onde estamos calculando campo e a posição do segmento $d\vec{\ell}$ pode ser escrita em termos de z e do raio R da espira:

$$r = \sqrt{z^2 + R^2}. \quad (25.5)$$

Assim,

$$dB_z = dB \cdot \sin \theta \quad (25.6)$$

$$= \left(\frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{Id\ell}{z^2 + R^2} \right) \cdot \sin \theta \quad (25.7)$$

$$= \left(\frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{Id\ell}{z^2 + R^2} \right) \cdot \left(\frac{R}{\sqrt{z^2 + R^2}} \right) \quad (25.8)$$

$$= \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{IR d\ell}{(z^2 + R^2)^{3/2}}. \quad (25.9)$$

Para determinarmos o campo total na direção do eixo z , basta agora realizarmos a integração ao longo do caminho formado pela espira:

$$B_z(z) = \oint \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{IR d\ell}{(z^2 + R^2)^{3/2}} \quad (25.10)$$

$$= \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{IR}{(z^2 + R^2)^{3/2}} \oint d\ell \quad (25.11)$$

$$= \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{IR}{(z^2 + R^2)^{3/2}} \cdot 2\pi R \quad (25.12)$$

$$= \frac{\mu_0}{2} \cdot \frac{IR^2}{(z^2 + R^2)^{3/2}}. \quad (25.13)$$

No caso de um grupo de N espiras de mesmas dimensões, próximas umas das outras, podemos escrever o campo magnético em termos da corrente i de uma espira como

$$B_z(z) = \frac{\mu_0}{2} \cdot \frac{iNR^2}{(z^2 + R^2)^{3/2}}. \quad (25.14)$$

25.1.1 Bobinas de Helmholtz

As bobinas de Helmholtz são uma configuração particular de dois grupos paralelos de espiras de mesmas dimensões, separadas por uma distância $h = R$. A corrente i nas espiras e seu sentido devem ser iguais nos dois grupos de espiras. Nesse caso, o campo na região central dos grupos de espiras é bastante uniforme, tornando esse tipo de aparelho útil para diversos tipos de aplicação.

Para determinarmos o campo na região central, basta somarmos o campo B_1 — devido ao primeiro grupo de espiras — e o campo

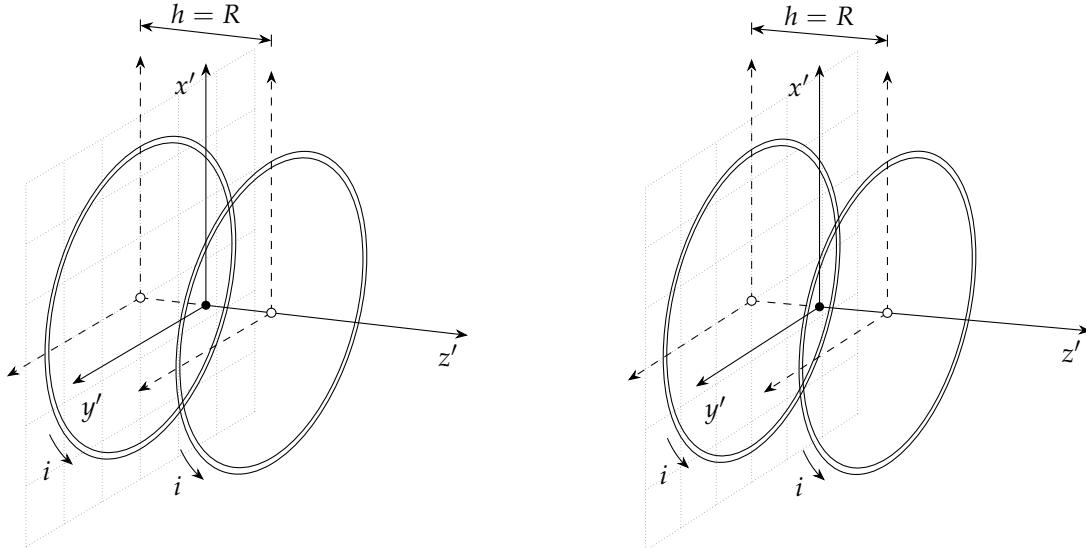


Figura 25.2: Figura estereoscópica: Bobinas de Helmholz.

B_2 — devido ao segundo grupo —. Note que a Equação (25.14) foi deduzida considerando que a origem do sistema de coordenadas estava localizada no centro da espira. Agora gostaríamos que a posição central entre as espiras fosse a origem de um eixo z' e que as bobinas estivessem localizadas nas posições $\pm R/2$. Nesse caso, temos que as variáveis z_1 e z_2 das expressões originais podem ser escritas em termos de z' como

$$z_1 = z' + R/2 \quad (25.15)$$

$$z_2 = z' - R/2, \quad (25.16)$$

para as bobinas localizadas nas posições $z'_1 = -R/2$ e $z'_2 = R/2$. Assim,

$$B_H(z') = B_1 + B_2 \quad (25.17)$$

$$= \frac{\mu_0 Ni}{2} \cdot \frac{R^2}{[(z' + R/2)^2 + R^2]^{3/2}} + \frac{\mu_0 Ni}{2} \cdot \frac{R^2}{[(z' - R/2)^2 + R^2]^{3/2}} \quad (25.18)$$

$$= \frac{\mu_0 Ni}{2} \cdot \left(\frac{R^2}{[(z' + R/2)^2 + R^2]^{3/2}} + \frac{R^2}{[(z' - R/2)^2 + R^2]^{3/2}} \right). \quad (25.19)$$

Na Figura 25.3 temos um gráfico da intensidade do campo magnético na região central entre as bobinas e podemos verificar que seu valor é aproximadamente constante. Para determinar tal valor, basta

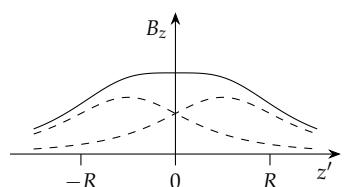


Figura 25.3: Intensidade do campo magnético no espaço entre as bobinas. As linhas tracejadas denotam os campos devidos às duas bobinas separadamente. Note que as intensidades máximas dessas duas curvas correspondem às posições $\pm R/2$, que são as posições das bobinas no eixo z . A linha cheia denota o campo total devido às duas bobinas. Note que entre $z' = -R/2$ e $z' = R/2$ temos que a intensidade é aproximadamente constante.

fazermos $z' = 0$ na Equação (25.19):

$$B_H(z' = 0) = \frac{\mu_0 Ni}{2} \cdot \left(\frac{R^2}{[(z' + R/2)^2 + R^2]^{3/2}} + \frac{R^2}{[(z' - R/2)^2 + R^2]^{3/2}} \right) \quad (25.20)$$

$$= \frac{\mu_0 Ni}{2} \cdot \left(\frac{R^2}{[(0 + R/2)^2 + R^2]^{3/2}} + \frac{R^2}{[(0 - R/2)^2 + R^2]^{3/2}} \right) \quad (25.21)$$

$$= \frac{\mu_0 Ni}{2} \cdot \left(\frac{R^2}{[R^2/4 + R^2]^{3/2}} + \frac{R^2}{[R^2/4]^2 + R^2]^{3/2}} \right) \quad (25.22)$$

$$= \frac{\mu_0 Ni}{2} \cdot \left(\frac{R^2}{[5R^2/4]^{3/2}} + \frac{R^2}{[5R^2/4]^2 + R^2]^{3/2}} \right). \quad (25.23)$$

Note que os dois termos dentro dos parêntesis são iguais, logo,

$$B_H(z' = 0) = \frac{\mu_0 Ni}{2} \cdot \left(2 \frac{R^2}{[5R^2/4]^{3/2}} \right) \quad (25.24)$$

$$= \frac{\mu_0 Ni}{2} \cdot \left(2 \frac{R^2}{R^3 [5/4]^{3/2}} \right) \quad (25.25)$$

$$= \frac{\mu_0 Ni}{R} \cdot \left(\frac{1}{[5/4]^{3/2}} \right) \quad (25.26)$$

$$= \frac{\mu_0 Ni}{R} \cdot \left(\frac{4}{5} \right)^{3/2} \quad (25.27)$$

25.1.2 Determinação do campo magnético terrestre

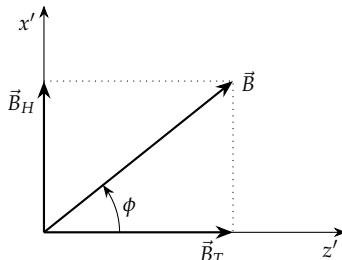


Figura 25.4: O campo total \vec{B} é dado pela soma vetorial dos campos da Terra \vec{B}_T e das bobinas \vec{B}_H .

Podemos utilizar uma bússola e as bobinas de Helmholtz para determinar a intensidade da componente horizontal do campo magnético da Terra. Isso é possível pois uma bússola na verdade simplesmente aponta na direção do campo magnético total no ponto onde está localizada, não necessariamente para o verdadeiro norte magnético.

Nesse caso, se dispusermos a bússola e as bobinas de forma que:

- A bússola esteja localizada na região central entre as bobinas e aponte inicialmente para o norte;
- O eixo das bobinas (denotado por z' na discussão acima) aponte perpendicularmente à direção da bússola;

teremos uma situação como a mostrada na Figura 25.4. Note que ao controlarmos a corrente que passa pelas bobinas, determinamos o campo magnético \vec{B}_H e a direção do vetor \vec{B} , uma vez que o campo \vec{B}_T é constante.

Para determinarmos o campo magnético da Terra, verificamos que — usando a definição da função tangente —

$$\tan \phi = \frac{B_H}{B_T}. \quad (25.28)$$

Consequentemente, podemos escrever a relação

$$B_H = B_T \cdot \tan \phi. \quad (25.29)$$

Portanto, se fizermos medidas da deflexão da agulha da bússola e do campo magnético B_H correspondente, podemos determinar o campo magnético B_T da Terra ao fazermos uma regressão linear dos dados de um gráfico $B_H \times \tan \phi$.

Note que podemos inverter o sentido da corrente nas bobinas, com uma consequente alteração no sentido do campo \vec{B}_H , o que causará uma deflexão da agulha da bússola no sentido oposto ao registrado com o sentido inicial para a corrente. Podemos usar desse artifício para obter mais dados experimentais e melhorar o resultado obtido para o valor do campo magnético B_T . Para isso, vamos registrar os dados para o ângulo ϕ contidos no quarto quadrante como ângulos negativos, medidos no sentido horário a partir do eixo z' . Correspondentemente, vamos considerar os valores de B_H que apontam no sentido negativo de x' como negativos.

25.2 Experimento

25.2.1 Objetivos

- Determinar a componente horizontal do campo magnético da Terra.

25.3 Material Necessário

- Bobinas de Helmholtz;
- Fonte de tensão regulável;
- Multímetro;
- Resistor de 20 W;
- Bússola e blocos de madeira;
- Cabos para ligações: banana-banana (3), banana-jacaré (2).

25.4 Procedimento Experimental

25.4.1 Ligações das bobinas

1. Mantenha a fonte desligada até o início do processo de tomada de dados;
2. Ligue o terminal negativo da fonte de tensão a um dos terminais do resistor;
3. Ligue o outro terminal do resistor ao terminal negativo de uma das bobinas;
4. Ligue o terminal positivo da bobina ao terminal negativo da outra bobina;
5. Ligue o terminal positivo da bobina ao terminal comum do multímetro;

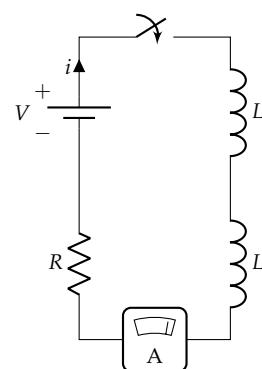


Figura 25.5: Circuito para as bobinas de Helmholtz (representados por L).

6. Ligue o terminal marcado como mA --- ao terminal positivo da fonte;

25.4.2 Disposição da bússola e das bobinas

1. Disponha a bússola sobre a mesa. Note que é necessário que a superfície da mesa esteja razoavelmente bem nivelada.
2. Certifique-se de que não haja nenhum material magnético próximo da bússola.¹
3. Verifique a direção do norte com a bússola;
4. Disponha as bobinas de Helmholtz de forma que o eixo das bobinas estejam perpendiculares à direção do norte;
5. Coloque o apoio de madeira entre as bobinas e coloque a bússola sobre ele. Tome cuidado para que a marca do norte na escala da bússola esteja apontando na direção norte indicada pela agulha. Provavelmente será necessário fazer pequenos ajustes.

25.4.3 Tomada de dados

1. Ajuste os controles de corrente para o *máximo* e os valores de tensão para o *mínimo*;
2. Verifique a posição da bússola e das bobinas de Helmholtz, certificando-se de que marca do norte coincida com a direção apontada pela agulha da bússola e que o eixo das bobinas aponta perpendicularmente à direção indicada pela agulha.
3. Ligue a fonte e proceda a ajustar a tensão lentamente, até que ocorra um desvio de 5° na direção da agulha da bússola em relação à direção inicial.
4. Anote o valor do ângulo e a corrente correspondente na Tabela 25.1.
5. Volte a aumentar a tensão, registrando o ângulo de deflexão e o valor da corrente a cada 5°. Cesse as medidas ao atingir um ângulo de deflexão de 70°.

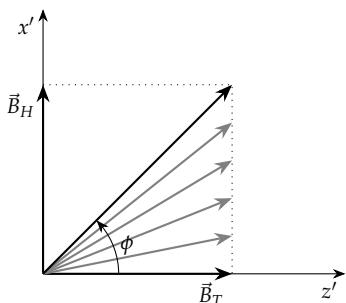


Figura 25.6: O campo total \vec{B} é o responsável pela deflexão da bússola. Como o campo magnético terrestre B_T é constante, o campo devido às bobinas de Helmholtz B_H é o responsável indireto pela deflexão da agulha da bússola.

Campo magnético terrestre

Turma: _____ Data: _____

Aluno(a): _____ Matrícula: _____

25.5 Questionário

Questão 1. (2 pontos) Preencha as colunas de dados experimentais das tabelas com o número adequado de algarismos significativos e unidades.

Questão 2. (2 pontos) Determine o valor do campo magnético B_H e preencha a terceira coluna da Tabela 25.1.

Questão 3. (4 pontos) Considerando os dados de B_H e de ϕ

- i. Elabore um gráfico linearizado dos dados.
- ii. Determine a componente horizontal do campo magnético terrestre através de uma regressão linear dos dados.

Questão 4. (2 pontos) Considerando os objetivos do experimento, listados na Seção 25.2.1, e os resultados obtidos nas questões anteriores, discuta quais objetivos foram atingidos com sucesso, justificando suas conclusões. Se algum objetivo não foi atingido, discuta quais são os possíveis motivos do insucesso e que providências podem ser tomadas para que eles sejam alcançados.

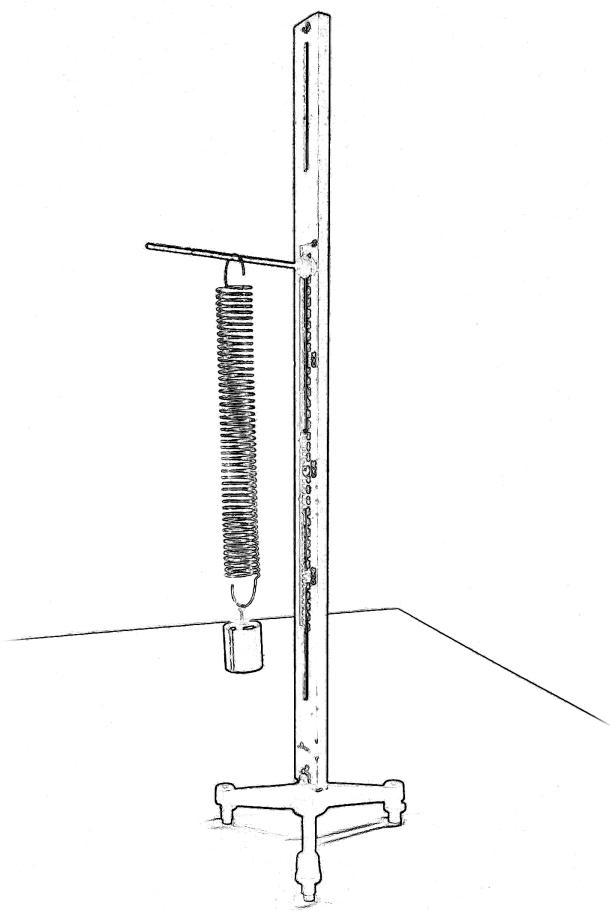
25.6 Tabelas

Dados da bobinas	
Diâmetro:	
N :	
Dados experimentais	
ϕ	i
Campo	
B_H	

Tabela 25.1: Dados para a deflexão da agulha de uma bússola em função da corrente nas bobinas de Helmholtz.

Bibliografia

- Lambert, Johann Heirich. "Beyträge zum Gebrauche der Mathematik und deren Anwendung". Em: Tufte, Edward R. *The Visual Display of Quantitative Information*. Cheshire, Connecticut: Graphics Press, 2001, p. 45. ISBN: 0-9613921-4-2.
- Marinelli, José Ricardo e Flavio Renato Ramos de Lima. *Laboratório de Física I*. 2^a Edição. UFSC/EAD/CED/CFM, 2010. ISBN: 978-85-8030-001-7.
- Piacentini, João J. et al. *Introdução ao Laboratório de Física*. 2^a Edição. Editora da UFSC, 2001.
- Taylor, John R. *An Introduction to Error Analysis*. 2nd Edition. University Science Books, 1997. ISBN: 0-935702-75-X.
- Tufte, Edward R. *The Visual Display of Quantitative Information*. Cheshire, Connecticut: Graphics Press, 2001. ISBN: 0-9613921-4-2.



ELABORADO USANDO L^AT_EX
DOCUMENTCLASS: TUFTE-BOOK
IMAGENS TRATADAS USANDO GIMP
FIGURAS ELABORADAS USANDO TIKZ