

Introdução às Medidas em Física

4300152

Experimento 3

Queda Livre

1

Experiência 2:

Queda Livre

- **Objetivos:**
 - Estudar o movimento de queda de um objeto
 - Medidas diretas de posição em função do tempo
 - Medidas indiretas da velocidade em função do tempo
 - Análise gráfica de dados
 - Apresentar dados de forma gráfica
 - Ajustar uma reta a conjunto de dados com comportamento linear
 - Obter os parâmetros da reta graficamente com incertezas.
 - Comparar com modelo de queda sob ação unicamente da força de gravidade
 - Obter o valor de g e comparar com esperado

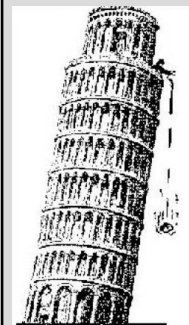
2

Estudo do Movimento de Queda de um Objeto

- Realizar a medida do movimento de um corpo em queda:
 - cuidados experimentais: formato do corpo; altura da queda; registro temporal confiável (marcador de tempo e registro na vertical)
 - utilização correta dos dados obtidos;
 - técnicas de análise de dados;
 - confecção de gráficos adequados;
 - interpretação dos resultados a partir de um modelo físico do experimento.
 - Compatibilidade do valor obtido para g com valor aceito para o local

3

Estudo do Movimento de Queda de um Objeto



- Aristóteles versus Galileu! → massa influencia ou não?
- Experimento realizado por Galileu – método científico.
- Ele corresponde a uma queda livre? Como verificar isso?
 - Os dados experimentais concordam com o modelo teórico?
 - É importante analisar o movimento temporal da queda e não somente o tempo de queda.



<https://www.youtube.com/watch?v=I7tEA8Vtc0o&feature=youtu.be>

4

Hipótese sobre o movimento

Um corpo em queda está sob a influência de uma força constante, a força da gravidade, portanto se movimenta com uma aceleração constante:

$$\vec{F} = m\vec{g} = m \frac{d\vec{v}}{dt}$$

O que leva às equações para velocidade e posição:

$$\vec{v}(t) = \vec{v}_0 + \vec{g} \cdot t$$

$$\vec{y}(t) = \vec{y}_0 + \vec{v}_0 \cdot t + \frac{\vec{g}}{2} \cdot t^2$$

5

Hipótese sobre o movimento

Observando o movimento na direção vertical (eixo-y orientado para baixo) pode-se abandonar a notação vetorial

$$v(t) = v_0 + g \cdot t$$

$$y(t) = y_0 + v_0 \cdot t + \frac{g}{2} \cdot t^2$$

corolário: a velocidade média num intervalo de tempo coincide com a velocidade instantânea no centro do intervalo de tempo:

$$\bar{v}([t_1, t_2]) = v\left(\frac{t_1 + t_2}{2}\right)$$

6

Experimento 3 - Queda Livre Laboratório Virtual de Mecânica

<http://www.fep.if.usp.br/~fisfoto/translacao/quedaLivre/videos/videoDemonstracao.mp4>

- Analisar o movimento de queda de um objeto usando:
 - um corpo em forma oval com um anel condutor a sua volta;
 - um trilho com dois fios condutores;
 - um eletroímã que segura o corpo no topo do trilho;
 - um faiscador que gera faíscas entre o anel condutor do corpo em queda e os fios do trilho a cada (1/60,00000 s) (frequência da rede elétrica);
 - uma fita que permite registrar as faíscas.

Uma câmera de vídeo que possibilita aquisição dos dados de posição do corpo oval para diversos tempos, em quadros obtidos da filmagem e disponíveis em:

<http://www.fep.if.usp.br/~fisfoto/translacao/quedaLivre/quadros.php>

Cada estudante vai receber um código que vai fazer a escolha do conjunto de quadros a empregar.

7

Experimento 3 - Queda Livre Laboratório Virtual de Mecânica

<http://www.fep.if.usp.br/~fisfoto/translacao/quedaLivre/videos/videoDemonstracao.mp4>

- Analisar o movimento de queda de um objeto usando:
 - um corpo em forma oval com um anel condutor a sua volta;
 - um trilho com dois fios condutores;
 - um eletroímã que segura o corpo no topo do trilho;
 - um faiscador que gera faíscas entre o anel condutor do corpo em queda e os fios do trilho a cada (1/60,00000 s) (frequência da rede elétrica);
 - uma fita que permite registrar as faíscas.

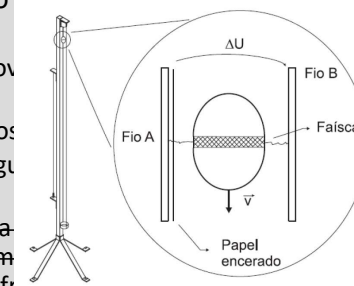


Figura 5.1: equipamento utilizado para o estudo da queda do corpo. As faíscas provocadas pelos pulsos de alta tensão entre os dois fios marcam um papel encerado.

8

Experimento 3 - Queda Livre Laboratório Virtual de Mecânica

<http://www.fep.if.usp.br/~fisfoto/translacao/quedaLivre/videos/videoDemonstracao.mp4>

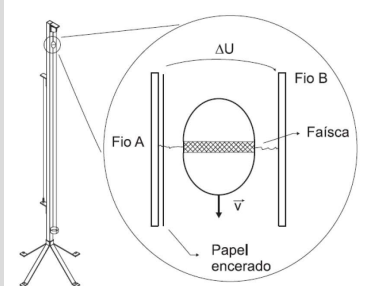
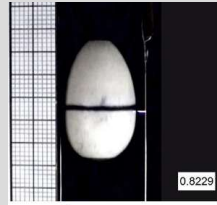


Figura 5.1: equipamento utilizado para o estudo da queda do corpo. As faíscas provocadas pelos pulsos de alta tensão entre os dois fios marcam um papel encerado.



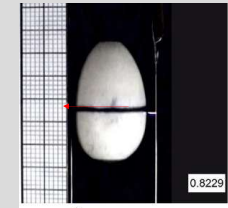
9

Experimento 3 - Queda Livre – Relatório em dupla Laboratório Virtual de Mecânica

<http://www.fep.if.usp.br/~fisfoto/translacao/quedaLivre/quadros.php>

Tomada de dados:

- Cada estudante vai receber **um código** para o conjunto de quadros correspondentes a uma queda livre. A dupla deve escolher um dos dois códigos e trabalhar com esses quadros
- Identifique nesse conjunto de dados qual a menor divisão da escala para a medida de y (posição vertical; 0,2cm ou 0,5cm) e qual a unidade de tempo usada (s ou ds).
- Intervalo de tempo entre quadros é fixo.
- Em cada quadro obtenha o tempo (marcado no canto inferior direito), e meça a posição vertical na escala fotografada: posição da parte superior da cinta escura no centro do objeto.
- Monte uma tabela com a ordem dos pontos, os valores de tempo (s) e os valores de y (cm) e incerteza.



Marque o código do conjunto de dados que está usando

10

Análise dos dados – vamos supor tempos sem incerteza (boa precisão da câmera) e tomar **1 ou 2 duvidosos** para medida de posição

Ordem do ponto	Tempo (s)	Posição vertical – y (cm)	Incerteza Δy (cm)
1	0,0042	0,75	0,25
2	0,0229	1,00	0,25
3	0,0417	1,50	0,25
4	0,0604	2,50	0,25
5	0,0792	4,00	0,25
6	0,0979	5,50	0,25
7	0,1167	7,50	0,25
8	0,1354	9,75	0,25
9	0,1542	12,50	0,25
10	0,1729	15,50	0,25

11

Análise dos dados – vamos supor tempos sem incerteza (boa precisão da câmera) e tomar **1 ou 2 duvidosos** para medida de posição

Ordem do ponto	Tempo (s)	Posição vertical – y (cm)	Incerteza Δy (cm)
1	0,0042	0,7	0,3
2	0,0229	1,0	0,3
3	0,0417	1,5	0,3
4	0,0604	2,5	0,3
5	0,0792	4,0	0,3
6	0,0979	5,5	0,3
7	0,1167	7,5	0,3
8	0,1354	9,7	0,3
9	0,1542	12,5	0,3
10	0,1729	15,5	0,3

12

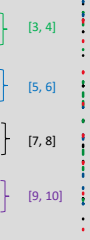
Análise dos dados – obtenção das velocidades instantâneas (por velocidades médias)

Ordem do ponto	Tempo (s)	Posição vertical – y (cm)	Incerteza Δy (cm)
1	0,0042	0,75	0,25
2	0,0229	1,00	0,25
3	0,0417	1,50	0,25
4	0,0604	2,50	0,25
5	0,0792	4,00	0,25
6	0,0979	5,50	0,25
7	0,1167	7,50	0,25
8	0,1354	9,75	0,25
9	0,1542	12,50	0,25
10	0,1729	15,50	0,25

$$\bar{v}([t_1, t_2]) = v\left(\frac{t_1 + t_2}{2}\right)$$

$$v\left(\frac{t_1 + t_2}{2}\right) = \bar{v}(t_1, t_2) = \frac{y_2 - y_1}{t_2 - t_1}$$

Método 1 – obtenção de velocidades nos instantes intermediários. Cada posição usada só uma vez



13

Análise dos dados – obtenção das velocidades instantâneas (por velocidades médias)

Ordem do ponto	Tempo (s)	Posição vertical – y (cm)	Incerteza Δy (cm)
1	0,0042	0,75	0,25
2	0,0229	1,00	0,25
3	0,0417	1,50	0,25
4	0,0604	2,50	0,25
5	0,0792	4,00	0,25
6	0,0979	5,50	0,25
7	0,1167	7,50	0,25
8	0,1354	9,75	0,25
9	0,1542	12,50	0,25
10	0,1729	15,50	0,25

$$v\left(\frac{t_1 + t_2}{2}\right) = \bar{v}(t_1, t_2) = \frac{y_2 - y_1}{t_2 - t_1}$$

Método 1 – SEGUNDO CONJUNTO. Cada posição usada só uma vez



14

Propagação de incertezas (Velocidade - determinação indireta)

- Nossa função: $f \equiv v = \frac{y_j - y_i}{t_j - t_i}$
- $(t_j - t_i)$ é fixo, e é uma constante (por hipótese sem incerteza)
- Cada posição y_j, y_i tem uma incerteza (da escala do instrumento)
- Novamente usamos a expressão geral para propagação de incertezas

$$\Delta f(x, y, z, \dots) = \sqrt{\left(\frac{\partial f(x, y, z, \dots)}{\partial x}\right)^2 \Delta X^2 + \left(\frac{\partial f(x, y, z, \dots)}{\partial y}\right)^2 \Delta Y^2 + \dots}$$

15

Propagação de incertezas (Velocidade - determinação indireta)

- Nossa função: $f \equiv v = \frac{y_j - y_i}{t_j - t_i}$
- $(t_j - t_i)$ é fixo, e é uma constante (por hipótese sem incerteza)
- Cada posição y_j, y_i tem uma incerteza (da escala do instrumento)
- Novamente usamos a expressão geral para propagação de incertezas

$$\left| \frac{\delta v}{\delta y_{j,i}} \right| = \frac{1}{t_j - t_i} \equiv \text{constante para cada método de obtenção de } v$$

Δv constante p/ cada método

$$\Rightarrow \Delta v = \sqrt{\left(\frac{1}{t_j - t_i}\right)^2 (\Delta y_j)^2 + \left(\frac{1}{t_j - t_i}\right)^2 (\Delta y_i)^2}$$

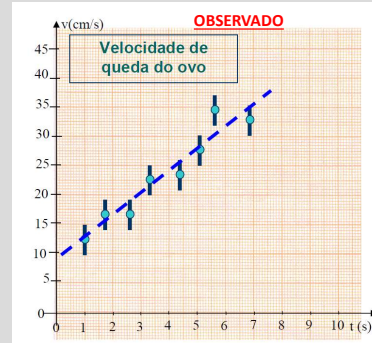
$$\Delta v \equiv \sqrt{2} \frac{1}{t_j - t_i} \Delta y_{i,j}$$

16

Representação gráfica

- Possibilita uma análise global e a verificação de tendências
 - Pode ser usado para quantificar, quando há um modelo esperado.
- Por exemplo:

$$v(t) = v_0 + g \cdot t$$

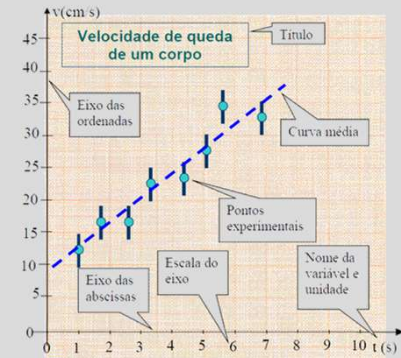


17

Representação gráfica Como fazer um gráfico

Todo gráfico é composto dos seguintes itens:

1. Título e legenda do gráfico;
2. Eixos das variáveis com os nomes das variáveis, escalas e unidades;
3. Dados experimentais e incertezas;
4. Funções teóricas ou curvas médias (esse último item é opcional e, dependendo das circunstâncias, pode ser omitido);



Material retirado de Capítulo IV Interpretação gráfica de dados de ApostilaFAP152_2018, disponível no e-disciplinas

Figura 3.1. Componentes típicos de um gráfico científico padrão.

18

Como fazer um gráfico

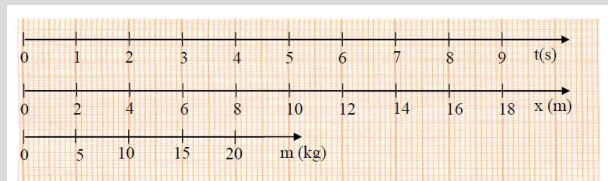


Figura 3.2. Alguns exemplos de formas CORRETAS de desenhar eixos em um gráfico.

19

Como NÃO fazer um gráfico

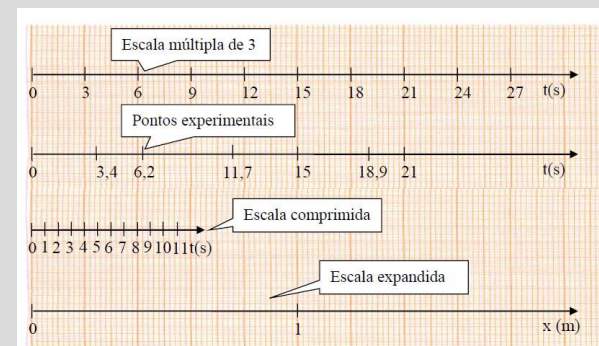


Figura 3.3. Algumas formas INCORRETAS de desenhar eixo em um gráfico.

20

Como fazer um gráfico

Barras de incerteza podem ser colocadas nas direções x e y, embora sejam mais comuns em y. Elas ajudam a verificar tendências / comportamentos das grandezas graficadas.

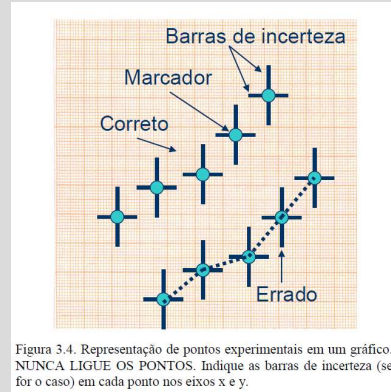


Figura 3.4. Representação de pontos experimentais em um gráfico. NUNCA LIGUE OS PONTOS. Indique as barras de incerteza (se for o caso) em cada ponto nos eixos x e y.

21

Como quantificar a partir do gráfico

Curva média segundo um modelo. No caso, reta média

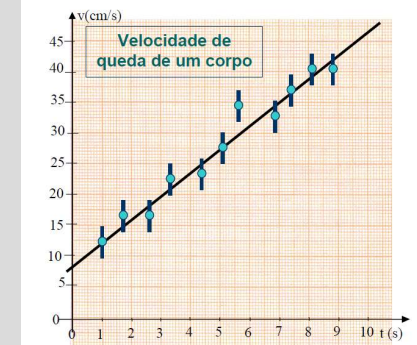


Figura 4.6. Velocidade de queda de um ovo com a sua respectiva reta média que é utilizada para extrair informações numéricas a respeito do movimento de queda.

22

Como quantificar a partir do gráfico

Curva média segundo um modelo. No caso, reta média é um modelo INADEQUADO

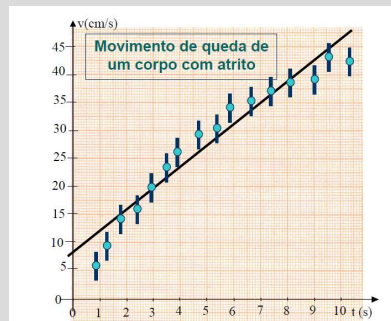


Figura 4.7. Conjunto de dados no qual o uso de uma reta média não é adequado para descrever o comportamento dos dados.

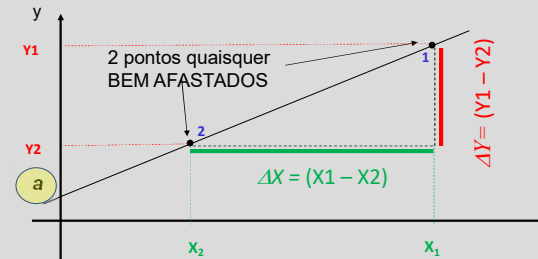
23

Análise Gráfica – EQUAÇÃO DA RETA

$$Y = a + b X$$

a = coeficiente linear (cruzamento eixo-y)

b = coeficiente angular = $\Delta Y / \Delta X$



24

Análise Gráfica

- Qual é a interpretação que podemos dar aos parâmetros da reta?
- Se os pontos se comportam de maneira linear, isso será uma indicação que o modelo da queda livre é bom para representar nossos dados;
- Portanto, a interpretação dos parâmetros é:

$$y = a + b \cdot x$$

$$v(t) = v_0 + g \cdot t$$

25

Avaliando v_0 e g – dois pontos são necessários

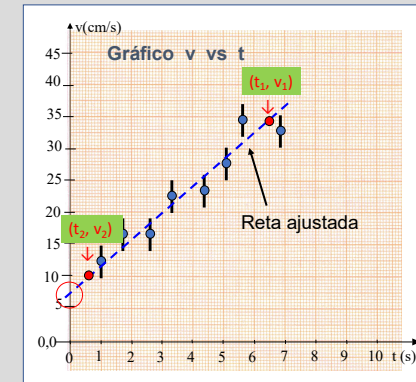
- v_0 – coeficiente linear
- Leitura direta no eixo-y
 $v_0 = 7,5$ cm/s
- Ou cálculo com pontos da reta

g – coeficiente angular:
escolha de 2 pontos
afastados

Le coordenadas e
calcular:
 $g = (v_1 - v_2) / (t_1 - t_2)$

$$(34,2 - 10,0) / (6,5 - 0,6)$$

$$g = 4,1 \text{ cm/s}^2$$



26

Incertezas nos parâmetros da reta

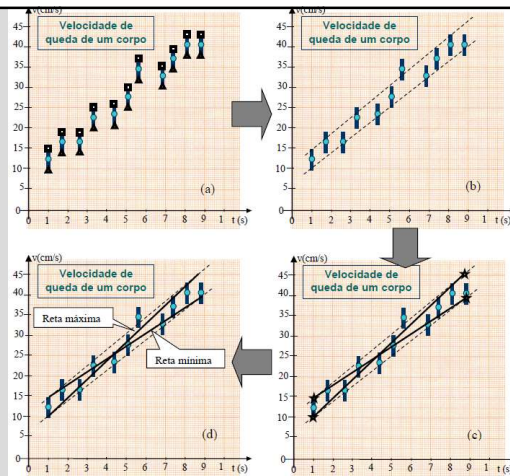


Figura 4.8. Procedimento para estimar as incertezas nos coeficientes da reta média.

27

Método 2 - Linearização de função

- A posição do corpo em queda livre é dada por:

$$y(t) = y_0 + v_0 \cdot t + \frac{g}{2} \cdot t^2$$

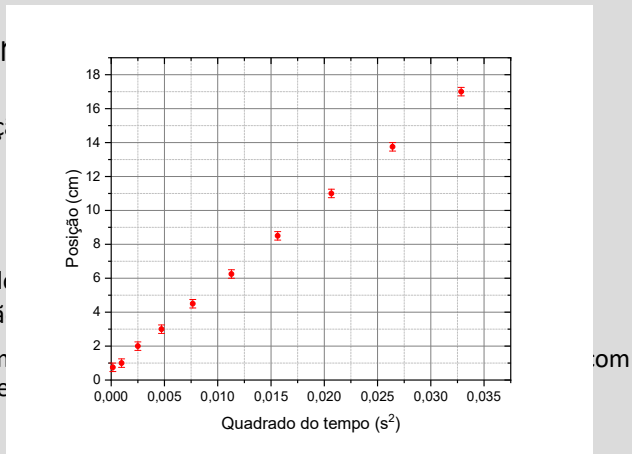
Se $v_0=0$, a expressão se resume a $y(t) = y_0 + \frac{g}{2} \cdot t^2$

- Fazendo a substituição de variável $z = t^2$, podemos obter uma equação de reta: $y(z) = y_0 + \frac{g}{2} z$
- Novamente podemos obter a gravidade local, graficamente com parâmetros de uma reta!

28

Linear

- A posição
- Fazendo equação
- Novam parâme



29

Análise Gráfica

- As incertezas de a (v_0) e b (g) são dadas por:

$$\Delta a = (a_{max} - a_{min})/2 \text{ e}$$

$$\Delta b = (b_{max} - b_{min})/2$$

- Empregando o **software webroot** (<http://webroot.if.usp.br/index.php>) é possível ajustar aos dados experimentais uma função linear com parâmetros a e b estatisticamente obtidos e com incertezas já atribuídas (método de mínimos quadrados que não será visto nesta disciplina).
- Uma vez com as incertezas calculadas, podemos avaliar se o resultado está de acordo com o modelo da queda livre, isto é, se os valores dos parâmetros estão compatíveis com os valores esperados segundo o modelo.

30

PARA O RELATÓRIO

Análise Gráfica da velocidade de queda

- O coeficiente linear (v_0) que você obteve é coerente com um movimento que se iniciou no repouso?
- Como avaliar se v_0 está dentro do esperado?
- O coeficiente angular é compatível com o valor da aceleração da gravidade?
- O IAG obteve o valor de $978,64 \pm 0,02 \text{ cm/s}^2$ para a aceleração da gravidade fazendo uma medida bastante precisa. Tome este valor como o esperado para a cidade de São Paulo.

31

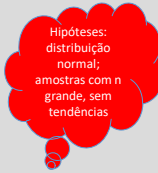
PARA O RELATÓRIO

Análise Gráfica da linearização (y versus t^2)

- O coeficiente linear (v_0) que você obteve é coerente com um movimento que se iniciou na origem?
- O coeficiente angular ($g/2$) forneceu um valor dada aceleração da gravidade compatível com o valor esperado?
- Compare os valores da aceleração da gravidade que obteve nos gráficos de velocidade e posição e comente sobre os métodos usados para obter g graficamente.

32

Critério para compatibilidade – teste Z



- Superposição em 1 desvio padrão → compatíveis
 - Superposição testada em intervalos mais largos 2 ou 3 desvios padrão: verificam compatibilidade com menor probabilidade.
- Teste Z indica essa probabilidade
 - Comparação entre $(a \pm \Delta_a)$ e $(b \pm \Delta_b)$

$$Z = \frac{|a - b|}{\sqrt{\Delta_a^2 + \Delta_b^2}}$$

$0 < Z \leq 1$, compatíveis dentro de 1 desvio-padrão (68%)
 $1 < Z \leq 2$, compatíveis dentro de 2 desvios-padrão (95%)
 $2 < Z \leq 3$, compatíveis dentro de 3 desvios-padrão (99,9%)
 $Z > 3$, discrepantes ou não compatíveis