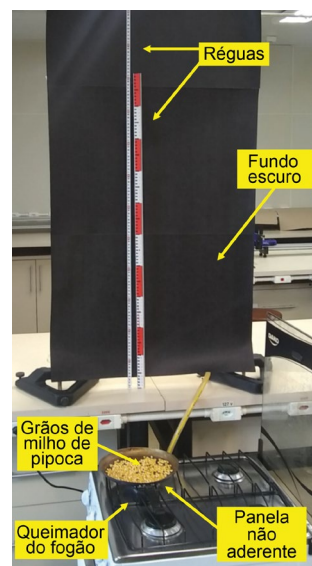
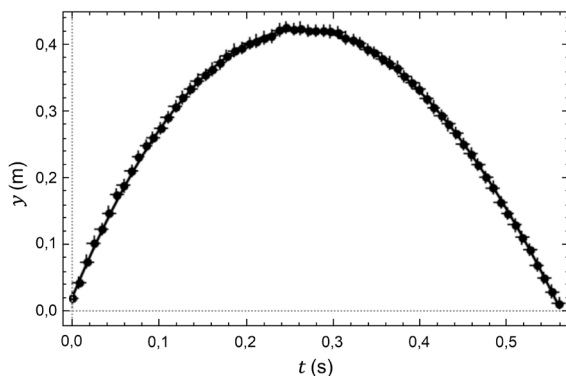


F01

Um artigo publicado na *Revista Brasileira de Ensino de Física*, em 2024, propõe um curioso experimento para medir a força de arrasto do ar em pipocas em movimento vertical. Para isso, os autores prepararam um sistema automatizado que mede a posição vertical y (m) em função do tempo t (s) de pipocas em voo após serem “estouradas” em uma panela aberta, como mostra a figura ao lado. O gráfico y versus t de um dos “voos” medidos também é exibido.



- Com base no gráfico y versus t , determine o deslocamento vertical máximo da pipoca nesse “voo”.
- Se a velocidade inicial da pipoca medida pelo experimento é de 3 m/s na vertical, qual seria o deslocamento vertical máximo na ausência de forças de arrasto e outras forças dissipativas?

Uma das conclusões do artigo é que a força de arrasto em uma pipoca típica pode ser modelada pela expressão $F_{arr} = -bv^2$, onde v é o módulo da velocidade da pipoca, o sinal “-” indica que a força é sempre contrária ao movimento e a constante b pode ser estimada pelas medidas do experimento como $b \approx 0,4$ g/m para velocidades acima de 2 m/s.

- Com base nessa expressão, qual é a velocidade máxima que uma pipoca de massa 0,2 g atinge após começar o seu movimento de queda vertical com velocidade inicial nula?

Note e adote:

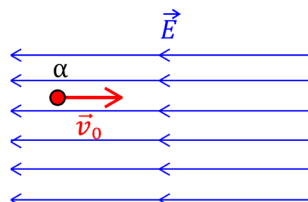
Aceleração da gravidade: $g = 10 \text{ m/s}^2$

F02

Um dos decaimentos radioativos mais relevantes é o decaimento alfa (α), em que um núcleo pesado, como Polônio 210 ou Urânio 235, decai emitindo uma partícula α , que é essencialmente um núcleo de Hélio formado por 2 prótons e 2 nêutrons. Como são partículas eletricamente carregadas, as partículas α podem ser aceleradas/desaceleradas por campos elétricos e/ou magnéticos. Por conta disso, embora sejam emitidas com energias da ordem de MeV, as partículas α perdem (transferem) grande parte dessa energia ao interagir com moléculas e átomos, seja no ar ou em tecidos biológicos. Nos itens a seguir, considere uma partícula α que foi emitida com energia cinética inicial de 5,30 MeV.

- Se a partícula α perde energia a uma taxa de 100 keV/ μm ao penetrar um tecido biológico como a pele, ela conseguiria atravessar a epiderme, que tem espessura de 0,1 mm? Justifique a sua resposta.

Considere uma situação em que a partícula α está se movendo sob a ação de um campo elétrico uniforme na mesma direção e em sentido oposto à sua velocidade, conforme mostra a figura:



- Se o campo elétrico tem módulo de 2×10^5 V/m, determine a magnitude da força elétrica que atua sobre a partícula α .
- Qual a magnitude do campo elétrico necessária para que a partícula α perca 1% de sua energia cinética inicial após percorrer 10 cm sob a ação desse campo?

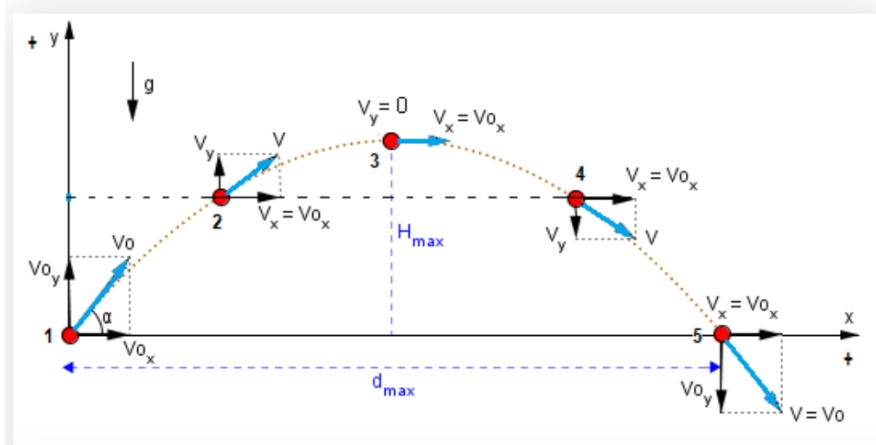
Note e adote:

Carga do próton: $q_p = +1,6 \times 10^{-19}$ C
1 eV = $1,6 \times 10^{-19}$ J

André V. Silva

16 de março de 2026

Representação da trajetória e do vetor velocidade



Introdução Teórica

O movimento de um objeto lançado verticalmente na presença da gravidade é um problema clássico da Mecânica. Em muitas situações ideais, despreza-se a resistência do ar e considera-se apenas a força peso atuando sobre o corpo. Entretanto, em sistemas reais, especialmente quando os objetos possuem baixa massa e grande área superficial, como é o caso de uma pipoca em voo, os efeitos da resistência do ar tornam-se relevantes e modificam significativamente o movimento.

Lançamento vertical sob ação da gravidade

Quando um objeto é lançado verticalmente com velocidade inicial v_0 , sob a ação exclusiva da gravidade, ele realiza um movimento uniformemente variado. A aceleração é constante e igual à aceleração da gravidade g , dirigida para baixo.

As equações cinemáticas que descrevem esse movimento são:

$$v_y(t) = v_{0y} - gt \quad (1)$$

$$y(t) = y_0 + v_{0y}t - \frac{1}{2}gt^2 \quad (2)$$

onde:

- $y(t)$ é a posição vertical em função do tempo,
- $v(t)$ é a velocidade instantânea,
- y_0 é a posição inicial,
- v_0 é a velocidade inicial,
- g é a aceleração da gravidade.

Durante a subida do objeto, sua velocidade diminui gradualmente até se anular no ponto mais alto da trajetória. Nesse ponto ocorre o deslocamento vertical máximo.

A altura máxima pode ser determinada a partir da equação de Torricelli:

$$v_y^2 = v_{0y}^2 - 2g(y - y_0) \quad (3)$$

No ponto mais alto, $v = 0$, resultando em:

$$h_{max} = \frac{v_{0y}^2}{2g} \quad (4)$$

Essa expressão fornece o deslocamento vertical máximo quando não existem forças dissipativas atuando no sistema.

Influência da resistência do ar

Na prática, o movimento de um corpo que se desloca em um fluido sofre a ação de uma força de resistência, conhecida como força de arrasto. Essa força depende da velocidade do objeto e atua sempre em sentido oposto ao movimento.

Para diversos regimes de velocidade, especialmente em objetos leves movendo-se no ar, uma aproximação comum consiste em modelar a força de arrasto como proporcional ao quadrado da velocidade:

$$F_{arr} = -bv^2 \quad (5)$$

onde:

- b é uma constante que depende das propriedades do fluido, da forma e da área do objeto,
- v é o módulo da velocidade do corpo,
- o sinal negativo indica que a força atua no sentido contrário ao movimento.

Assim, a equação dinâmica que descreve o movimento passa a ser obtida a partir da Segunda Lei de Newton:

$$\sum F = ma \quad (6)$$

Durante a queda vertical, duas forças principais atuam sobre o corpo:

- a força peso $P = mg$, dirigida para baixo;
- a força de arrasto F_{arr} , dirigida para cima quando o corpo se move para baixo.

A equação de movimento pode então ser escrita como:

$$mg - bv^2 = ma \quad (7)$$

Velocidade terminal

À medida que o corpo cai, sua velocidade aumenta e, conseqüentemente, o módulo da força de arrasto também cresce. Em determinado momento, essa força torna-se suficientemente grande para equilibrar a força peso.

Quando isso ocorre, a força resultante sobre o corpo torna-se nula:

$$mg = bv^2 \quad (8)$$

Nessa condição, a aceleração desaparece e o corpo passa a mover-se com velocidade constante. Essa velocidade é denominada **velocidade terminal**.

Resolvendo a equação para v , obtém-se:

$$v_t = \sqrt{\frac{mg}{b}} \quad (9)$$

Esse resultado mostra que a velocidade terminal depende da massa do objeto, da aceleração da gravidade e da constante de arrasto associada ao meio e à geometria do corpo.

Análise experimental do movimento

Uma forma eficiente de estudar esse tipo de movimento consiste em registrar experimentalmente a posição do objeto ao longo do tempo, obtendo um gráfico $y(t)$. A análise desse gráfico permite determinar grandezas importantes como:

- o deslocamento vertical máximo,
- o tempo de subida e descida,
- a influência das forças dissipativas no movimento.

Experimentos desse tipo são particularmente interessantes em objetos leves, como pipocas, pois a interação com o ar é significativa e permite observar claramente os efeitos da resistência do fluido.

F1 - Resolução

Questão - Movimento vertical com resistência do ar

Resolução

O problema descreve o movimento vertical de uma pipoca após ser lançada para cima quando o grão estoura. O experimento mede a posição vertical y em função do tempo t , permitindo analisar o movimento por meio do gráfico apresentado.

(a) Determinação do deslocamento vertical máximo a partir do gráfico

O deslocamento vertical máximo corresponde ao ponto mais alto da trajetória da pipoca. No gráfico $y \times t$, esse valor corresponde ao vértice da curva.

Observando o gráfico:

- o eixo vertical representa a posição y em metros;
- os valores variam aproximadamente entre 0 e 0,45 m;
- o ponto máximo da curva ocorre aproximadamente em $y \approx 0,42$ m.
- Detalhe: posição inicial na vertical é 0,02 m

Portanto, o deslocamento vertical máximo medido experimentalmente é aproximadamente

$$y_{\max} \approx 0,42 \text{ m} - 0,02 = 0,40 \text{ m.} \quad (10)$$

Esse valor é obtido diretamente da análise do gráfico experimental.

(b) Deslocamento máximo na ausência de forças dissipativas

Agora considera-se a situação ideal em que apenas a força peso atua sobre a pipoca, ou seja, despreza-se a resistência do ar.

Nesse caso, o movimento vertical é uniformemente variado e podemos utilizar a equação de Torricelli:

$$v_y^2 = v_{0y}^2 - 2g(y - y_0) \quad (11)$$

No ponto mais alto da trajetória, a velocidade é nula:

$$v_y = 0 \quad (12)$$

Logo,

$$0 = v_{0y}^2 - 2gh_{\max} \quad (13)$$

onde $h_{\max} = y - y_0$ representa o deslocamento vertical máximo.

Isolando $h_{\max}$:

$$h_{\max} = \frac{v_{0y}^2}{2g} \quad (14)$$

Substituindo os valores fornecidos:

$$v_0 = 3 \text{ m/s} \quad (15)$$

$$g = 10 \text{ m/s}^2 \quad (16)$$

temos

$$h_{\text{max}} = \frac{(3)^2}{2 \cdot 10} \quad (17)$$

$$h_{\text{max}} = \frac{9}{20} \quad (18)$$

$$h_{\text{max}} = 0,45 \text{ m} \quad (19)$$

Portanto, na ausência de forças dissipativas, o deslocamento vertical máximo seria

$$h_{\text{max}} = 0,45 \text{ m}. \quad (20)$$

Esse valor é ligeiramente maior do que o valor experimental obtido no item anterior, o que evidencia o efeito da resistência do ar no experimento.

(c) Velocidade máxima durante a queda (velocidade terminal)

O problema informa que a força de arrasto pode ser modelada pela expressão

$$F_{\text{arr}} = -bv^2 \quad (21)$$

onde:

- b é uma constante experimental;
- v é o módulo da velocidade;
- o sinal negativo indica que a força é contrária ao movimento.

Durante a queda vertical, atuam duas forças principais sobre a pipoca:

- a força peso $P = mg$, dirigida para baixo;

- a força de arrasto F_{arr} , dirigida para cima.

A velocidade máxima ocorre quando a aceleração se torna nula, isto é, quando a força resultante é zero. Essa velocidade é chamada de **velocidade terminal**.

Aplicando a segunda lei de Newton:

$$\sum F = ma \quad (22)$$

Na condição de velocidade terminal:

$$a = 0 \quad (23)$$

Logo,

$$mg - bv^2 = 0 \quad (24)$$

ou

$$mg = bv^2 \quad (25)$$

Isolando v :

$$v = \sqrt{\frac{mg}{b}} \quad (26)$$

Substituição dos valores

A massa da pipoca é

$$m = 0,2 \text{ g} \quad (27)$$

Convertendo para unidades do SI:

$$m = 0,2 \times 10^{-3} \text{ kg} \quad (28)$$

$$m = 2 \times 10^{-4} \text{ kg} \quad (29)$$

A constante de arrasto fornecida é

$$b = 0,4 \text{ g/m} \quad (30)$$

Convertendo:

$$b = 0,4 \times 10^{-3} \text{ kg/m} \quad (31)$$

$$b = 4 \times 10^{-4} \text{ kg/m} \quad (32)$$

Substituindo na expressão da velocidade terminal:

$$v = \sqrt{\frac{(2 \times 10^{-4})(10)}{4 \times 10^{-4}}} \quad (33)$$

$$v = \sqrt{\frac{20}{4}} \quad (34)$$

$$v = \sqrt{5} \quad (35)$$

$$v \approx 2,24 \text{ m/s} \quad (36)$$

Portanto, a velocidade máxima que a pipoca atinge durante a queda é aproximadamente

$$v_{\text{max}} \approx 2,2 \text{ m/s}. \quad (37)$$

Conclusão

- O deslocamento vertical máximo observado no experimento é aproximadamente 0,40 m.
- Na ausência de resistência do ar, a altura máxima seria 0,45 m.
- A velocidade máxima durante a queda, determinada pelo equilíbrio entre peso e arrasto, é aproximadamente 2,2 m/s.

Esses resultados mostram claramente o efeito da resistência do ar no movimento de objetos leves, como uma pipoca em voo.

Questão F02

Um núcleo pesado pode sofrer decaimento alfa, emitindo uma partícula α que é essencialmente um núcleo de hélio composto por dois prótons e dois nêutrons.

Considere uma partícula α emitida com energia cinética inicial de 5,30 MeV.

Dados:

- $q_p = 1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$
- $1 \text{ eV} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ J}$

a) Verificar se a partícula atravessa a epiderme

A taxa de perda de energia é

$$\frac{dE}{dx} = 100 \text{ keV}/\mu\text{m} \quad (38)$$

A energia inicial da partícula é

$$E_0 = 5,30 \text{ MeV} \quad (39)$$

Convertendo para keV:

$$5,30 \text{ MeV} = 5300 \text{ keV} \quad (40)$$

A distância máxima que a partícula percorre antes de perder toda energia é

$$x = \frac{E_0}{dE/dx} \quad (41)$$

$$x = \frac{5300}{100} \quad (42)$$

$$x = 53 \mu\text{m} \quad (43)$$

A espessura da epiderme é

$$0,1 \text{ mm} = 100 \text{ } \mu\text{m} \quad (44)$$

Como

$$53 \text{ } \mu\text{m} < 100 \text{ } \mu\text{m} \quad (45)$$

conclui-se que

$$\boxed{\text{A partícula não atravessa a epiderme.}} \quad (46)$$

Ela perde toda sua energia antes de percorrer a espessura total da pele.

b) Força elétrica sobre a partícula

A carga da partícula α é

$$q_\alpha = 2q_p \quad (47)$$

$$q_\alpha = 2(1,6 \times 10^{-19}) \quad (48)$$

$$q_\alpha = 3,2 \times 10^{-19} \text{ C} \quad (49)$$

A força elétrica é dada por

$$F = qE \quad (50)$$

Com

$$E = 2 \times 10^5 \text{ V/m} \quad (51)$$

$$F = (3,2 \times 10^{-19})(2 \times 10^5) \quad (52)$$

$$F = 6,4 \times 10^{-14} \text{ N} \quad (53)$$

Portanto,

$$\boxed{F = 6,4 \times 10^{-14} \text{ N}} \quad (54)$$

c) Campo elétrico necessário

A partícula deve perder

$$1\% \text{ da energia cinética inicial} \quad (55)$$

Primeiro convertamos a energia para Joules.

$$E_0 = 5,30 \text{ MeV} \quad (56)$$

$$E_0 = 5,30 \times 10^6 \text{ eV} \quad (57)$$

$$E_0 = 5,30 \times 10^6 (1,6 \times 10^{-19}) \quad (58)$$

$$E_0 = 8,48 \times 10^{-13} \text{ J} \quad (59)$$

A variação desejada é

$$\Delta K = 0,01 E_0 \quad (60)$$

$$\Delta K = 8,48 \times 10^{-15} \text{ J} \quad (61)$$

O trabalho da força elétrica é

$$W = qEd \quad (62)$$

Como o campo é oposto ao movimento, ele retira energia da partícula:

$$\Delta K = qEd \quad (63)$$

Com

$$d = 10 \text{ cm} = 0,1 \text{ m} \quad (64)$$

Substituindo:

$$E = \frac{\Delta K}{qd} \quad (65)$$

$$E = \frac{8,48 \times 10^{-15}}{(3,2 \times 10^{-19})(0,1)} \quad (66)$$

$$E = 2,65 \times 10^5 \text{ V/m} \quad (67)$$

Portanto,

$$\boxed{E \approx 2,7 \times 10^5 \text{ V/m}} \quad (68)$$

Resultado Final

- A partícula percorre aproximadamente

$$53 \text{ } \mu m \quad (69)$$

logo não atravessa a epiderme.

- Força elétrica:

$$F = 6,4 \times 10^{-14} \text{ N} \quad (70)$$

- Campo elétrico necessário:

$$E \approx 2,7 \times 10^5 \text{ V/m} \quad (71)$$