Olimpíada Brasileira de Física
Prova Ensino Médio - 1^o e 2^o anos - Nível II
Primeira Fase - 2023

Gabarito elaborado pela equipe do projeto de extensão *Elaboração de Material de Preparação para a Olimpíada Brasileira de Física (OBF)*, do Instituto de Física da Universidade Federal do Rio de Janeiro (IF-UFRJ).

Equipe

Daniel Madureira Vieira Couto   Francisco Nery Abrantes   Laura Stolze Lima Portugal
Nathan Machado Vasconcelos   Thiago Bueno Dalpiaz

Revisão

Prof. Marcos G. Menezes

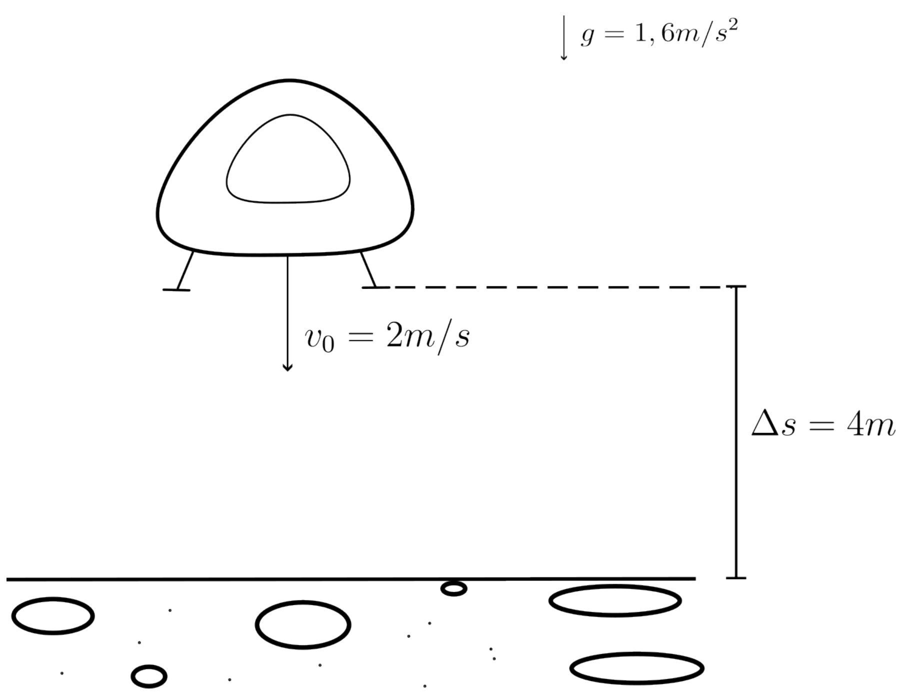
---

1. Imagine uma cápsula espacial (a parte da nave onde se encontram os astronautas de certa missão) está descendo para a Lua com velocidade constante de 2 m/s. Quando se encontra a uma altura de 4 m da superfície lunar, os motores são desligados e a cápsula cai livremente. A aceleração da gravidade na superfície da Lua é de 1,6 m/s^2 . A que velocidade (em m/s) a nave tocará o solo lunar? Observação: este é um dado muito importante para a segurança da tripulação.

a) 3,6
b) 4,1
c) 12,8
d) 14,8
e) 16,8

Resolução

Primeiramente, é essencial escolher um referencial e origem adequados para nosso problema. Como a nave espacial possui velocidade inicial orientada *para baixo*, isto é, em direção à Lua, tal como a gravidade, é conveniente escolhermos o nosso referencial apontando para baixo. Além disso, podemos escolher a origem do sistema na posição da cápsula no momento em que o motor é desligado.



Conhecemos sua velocidade inicial $v_0 = 2$ m/s, posição inicial $y_0 = 0$, sua posição final $y = 4$ m e aceleração $a = 1{,}6$ m/s^2. Como a aceleração é constante, podemos usar a equação de Torricelli para descobrir a velocidade com que a espaçonave irá pousar:

$$\begin{aligned} v_y^2 &= v_{0y}^2 + 2a\Delta y \\ &= (2 \text{ m/s})^2 + 2 \cdot 1{,}6 \text{ m/s}^2 \cdot 4 \text{ m} \\ &= 16{,}8 \text{ (m/s)}^2 \end{aligned}$$

Portanto:

$$v_y = \sqrt{16{,}8\ (\text{m/s})^2} \approx 4{,}1\ \text{m/s} \tag{1}$$

RESPOSTA: Alternativa B

■

2. Considere um cubo sólido feito totalmente de plástico, exceto por uma cavidade esférica em seu centro. Sabe-se que o cubo, que tem arestas de 5,0 cm, permanece em equilíbrio sem afundar e nem emergir quando posto em um recipente com água. Considerando que a densidade do plástico é 1,35 g/cm^3 , o raio da cavidade interna do cubo, em cm, é

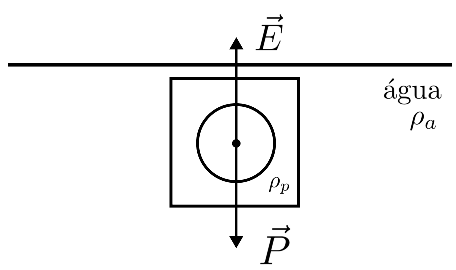
a) 1,7
b) 2,0
c) 2,3
d) 2,6
e) 4,2

Resolução

Chamemos o comprimento de uma aresta do cubo de d e o raio da cavidade de R. Como o cubo está parado, infere-se que ele está em equilíbrio, o que, pela primeira lei de Newton, nos dá que a soma das forças que atuam sobre ele deve ser nula:

$$\sum_i \vec{F}_i = \vec{0} \tag{2}$$

A figura abaixo mostra o diagrama de forças que atuam sobre o corpo, onde podemos identificar as forças peso $\vec{\boldsymbol{P}}$ e empuxo $\vec{\boldsymbol{E}}$.



A condição de equilíbrio nos dá que

$$\vec{\boldsymbol{P}} + \vec{\boldsymbol{E}} = \vec{\boldsymbol{0}} \tag{3}$$

Agora, as expressões das forças peso e empuxo são dadas, respectivamente, em módulo por

$$P = mg \qquad\qquad E = \rho_a V_d g \tag{4}$$

onde m é a massa do cubo, ρ_a é a densidade da água e V_d é o volume de água deslocado pelo cubo. Substituindo as expressões (4) em (3), obtemos

$$m\cancel{g} = \rho_a V_d \cancel{g} \tag{5}$$

Levando em conta ainda que o cubo está totalmente submerso, devemos ter $V_d = V = d^3$, ou seja, o volume de água deslocado é igual ao volume do cubo.

Por outro lado, podemos escrever a massa do cubo como

$$m = \rho_p V_p \tag{6}$$

onde ρ_p é a densidade do plástico e V_p é o volume efetivamente ocupado pelo plástico, isto é, excluído o volume da cavidade. Levando isso em conta, obtemos

$$m = \rho_p \left(d^3 - \frac{4}{3}\pi R^3 \right) \tag{7}$$

onde a primeira parcela no termo entre parênteses representa o volume do cubo e a segunda o volume da cavidade esférica. Substituindo a expressão acima em (5), encontramos

$$\begin{aligned}
\rho_p\left(d^3-\frac{4}{3}\pi R^3\right) &= \rho_a d^3 \\
(\rho_p-\rho_a)\,d^3 &= \frac{4}{3}\pi\rho_p R^3 \\
R^3 &= \frac{3}{4\pi}\left(\frac{\rho_p-\rho_a}{\rho_p}\right)d^3 \\
R &= d\sqrt[3]{\frac{3}{4\pi}\left(\frac{\rho_p-\rho_a}{\rho_p}\right)} \qquad (8)
\end{aligned}$$

Substituindo, por fim, os valores conhecidos na equação acima ($\rho_a = 1{,}00\ \text{g/cm}^3$, fornecido no cabeçalho), obtemos

$$R = 5\ \text{cm}\cdot\sqrt[3]{\frac{3}{4\pi}\left(\frac{1{,}35\ \text{g/cm}^3-1{,}00\ \text{g/cm}^3}{1{,}35\ \text{g/cm}^3}\right)} \approx 5\ \text{cm}\cdot\sqrt[3]{0{,}064} \approx 5\ \text{cm}\cdot 0{,}4 = 2{,}0\ \text{cm} \qquad (9)$$

RESPOSTA: Alternativa B

■

3. Sob certas circunstâncias, muitos gases apresentam comportamento semelhante ao de um gás ideal ou perfeito, no qual, as partículas que o compõem interagem apenas por colisões perfeitamente elásticas e se movem aleatoriamente. Qual dos gráficos a seguir melhor representa o volume de certa massa de um gás perfeito em função da sua temperatura absoluta em um processo que mantém sua pressão constante?

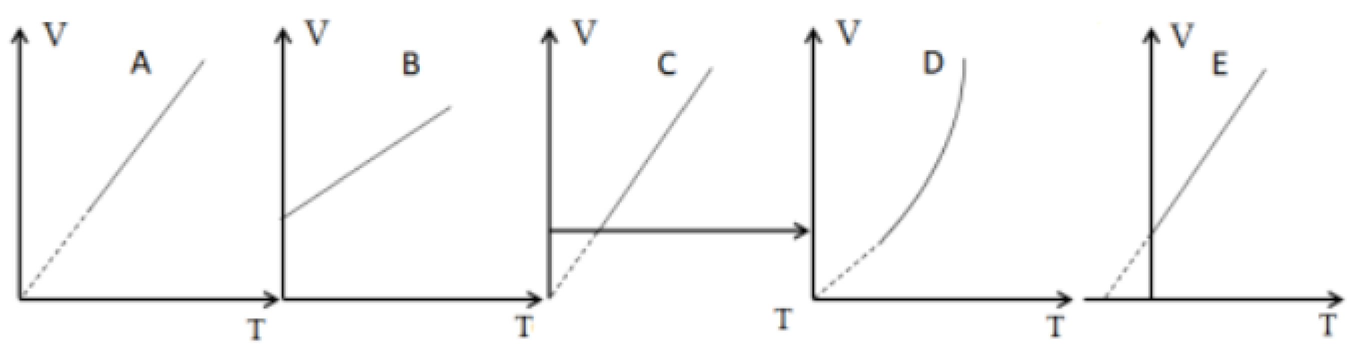


Figura 1

a) Gráfico A
b) Gráfico B
c) Gráfico C
d) Gráfico D
e) Gráfico E

Resolução

Como estamos lidando com um gás ideal, sabemos que ele obedecerá a seguinte equação de estado:

$$pV = nRT \qquad (10)$$

onde "p" é a pressão do gás, "V" o volume, "n" o número de mols, "R" a constante universal dos gases e "T" a temperatura. Isolando V na equação acima e considerando um processo onde p é constante, verificamos que a relação entre o volume V e a temperatura T é dada por uma função afim com um coeficiente linear igual a zero. Assim, analisando cada alternativa:

a) CORRETA: Como pode-se ver, temos uma função afim que passa pela origem do sistema de coordenadas.
b) ERRADA: Aqui, apesar de termos uma função afim, pode-se ver que o seu coeficiente linear é diferente de zero, pois o gráfico não passa pela origem.

c) ERRADA: De novo temos uma função afim, porém, seu coeficiente linear é diferente de zero. Ademais, esse coeficiente é negativo, de forma que, para temperaturas abaixo de um certo valor positivo, teremos volumes negativos, e isso não possui sentido físico.

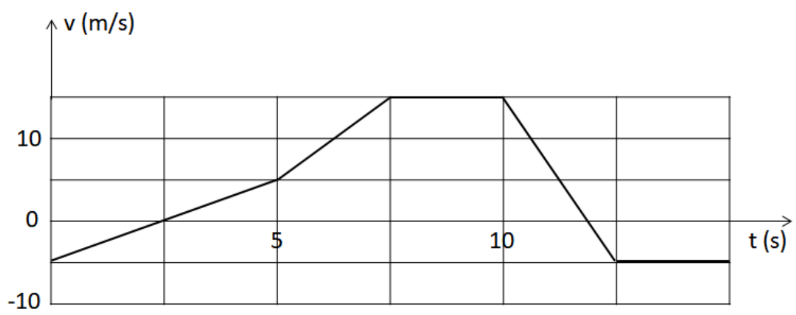
d) ERRADA: A função possui alguma curvatura, portanto não se trata de uma função afim .

e) ERRADA: De novo temos uma função afim, porém ela possui um coeficiente linear diferente de zero.

RESPOSTA: Alternativa A

■

4. A figura mostra o gráfico do movimento de um corpo durante 15 segundos. Em relação a este gráfico, faça um análise do mesmo e encontre o máximo valor do módulo da aceleração (em m/s^2).



a) 2
b) 4
c) 6
d) 8
e) 16

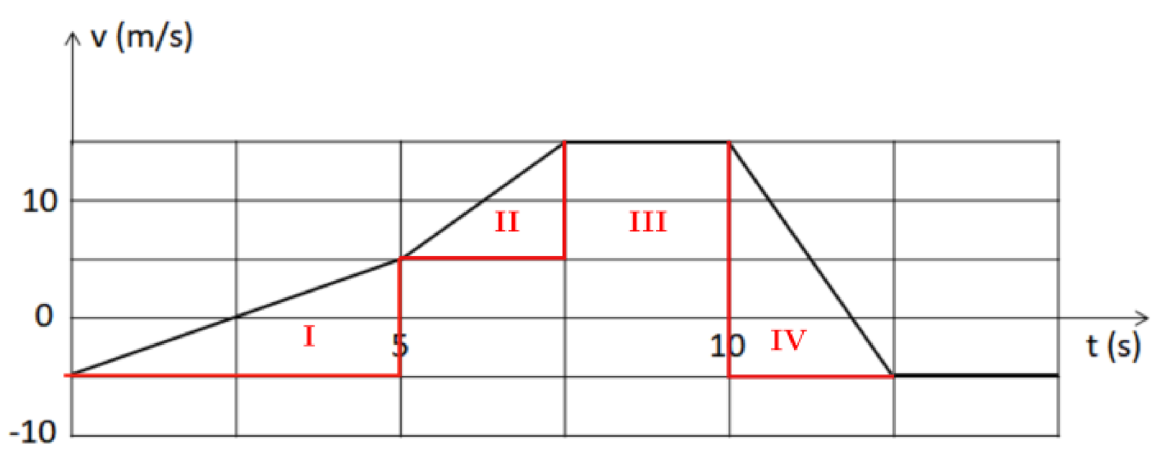
Resolução

Observe que o gráfico é formado pela união de trechos retilíneos, de forma que cada um desses trechos deve corresponder a um movimento de aceleração constante ou nula. Nesses casos, podemos calcular a aceleração a partir do coeficiente angular da reta correspondente a cada trecho, ou seja:

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} \tag{11}$$

onde Δv é a variação de velocidade durante um intervalo de tempo Δt. Note que, quanto mais inclinada para cima estiver a reta, maior será o coeficiente angular.

Vamos então dividir o gráfico nesses diferentes trechos, como mostrado na figura abaixo.



Para cada uma das regiões destacadas acima onde o gráfico é uma reta, podemos encontrar a aceleração associada.

Para a região I:

$$a_I = \frac{5\ \text{m/s} - (-5)\ \text{m/s}}{5\ \text{s} - 0\ \text{s}} = 2\ \text{m/s}^2 \tag{12}$$

Para a região II:

$$a_{II} = \frac{15\text{ m/s} - 5\text{ m/s}}{7{,}5\text{ s} - 5\text{ s}} = 4\text{ m/s}^2 \tag{13}$$

Para a região III:

$$a_{III} = \frac{15\text{ m/s} - 15\text{ m/s}}{10\text{ s} - 7{,}5\text{ s}} = 0\text{ m/s}^2 \tag{14}$$

Note que, nessa região, a reta é horizontal e a aceleração é nula (tal como o coeficiente angular), por isso a velocidade do corpo é constante.

Por fim, para a região IV:

$$a_{IV} = \frac{-5\text{ m/s} - 15\text{ m/s}}{12{,}5\text{ s} - 10\text{ s}} = -8\text{ m/s}^2 \tag{15}$$

Portanto, o valor máximo do módulo da aceleração é 8 m/s^2.

RESPOSTA: Alternativa D

■

5. A lei de Snell é baseada no principio de Fermat. Esta lei mostra a relação, entre os ângulos de incidência e de refração da luz quando atravessa a fronteira entre dois meios com índices de refração diferentes. Sempre que este fenômeno acontece, há uma variação:

   a) da frequência e da velocidade.
   b) da frequência e do comprimento de onda.
   c) do comprimento de onda e da velocidade.
   d) da frequência, do comprimento de onda e da velocidade.
   e) só da velocidade.

Resolução

Sabemos que a velocidade da luz se altera ao se propagar em um meio material, ou seja, ela assume um valor diferente daquele observado no vácuo. Assim, como há uma mudança de meio, há uma mudança de velocidade. Ademais, a frequência de uma onda é determinada inteiramente pela sua fonte emissora, de forma que ela não se altera com a mudança de meio. Finalmente, utilizando a equação fundamental da ondulatória:

$$v = \lambda f, \tag{16}$$

onde v é o módulo da velocidade da onda, λ o comprimento de onda e f a sua frequência, vemos que, para que a velocidade mude e a frequência se mantenha constante, o seu comprimento de onda deve variar proporcionalmente à velocidade.

RESPOSTA: Alternativa C

■

6. Uma bola de futebol de massa m se choca com uma parede com velocidade v e quica na mesma direção (sentido contrário), com a mesma velocidade (choque perfeitamente elástico). Em relação à energia e momento linear da bola e da parede antes e depois do choque, podemos afirmar que:

   a) a bola apenas recebeu energia da parede.
   b) a bola apenas cedeu energia para a parede.
   c) a bola e a parede trocaram apenas momento linear.
   d) a bola e a parede trocaram energia e momento linear.
   e) a parede e a bola não trocaram nem energia nem momento linear.

Resolução

Se o choque é perfeitamente elástico, a energia cinética total do sistema deve ser completamente conservada, ou seja, podemos desprezar a ação de forças dissipativas no processo. Além disso, sabemos, pela prática do dia a dia, que a massa da parede é muito maior que a da bola. Dessa forma, o momento linear que a bola transmite para a parede resulta em uma velocidade muito pequena para a parede logo após a colisão, que pode ser desprezada. Por isso a bola retorna com uma velocidade de mesmo módulo e sentido contrário.

Portanto, considerando as hipóteses acima, concluímos que a bola e a parede trocam apenas momento linear durante o choque, respeitando a conservação de momento linear total do sistema.

OBS: Convém destacar, no entanto, que em um processo realístico devemos levar em conta processos dissipativos que resultam da colisão (por mais fracos que sejam), tais como a geração de calor e a propagação de ondas elásticas na parede, além do próprio recuo da parede.

RESPOSTA: Alternativa C

■

7. Uma partícula se move do ponto 1 ao ponto 2, veja figura, sob a ação da força $\vec{\boldsymbol{F}} = 2\hat{\boldsymbol{i}} + \hat{\boldsymbol{j}}$. As componentes da força são dadas em newtons e o reticulado da figura tem um espaçamento de 1 metro. Além disso, $\hat{\boldsymbol{i}}$ e $\hat{\boldsymbol{j}}$, são vetores unitários, paralelos, respectivamente, aos eixo x e y. O trabalho W, em J, realizado pela força é:

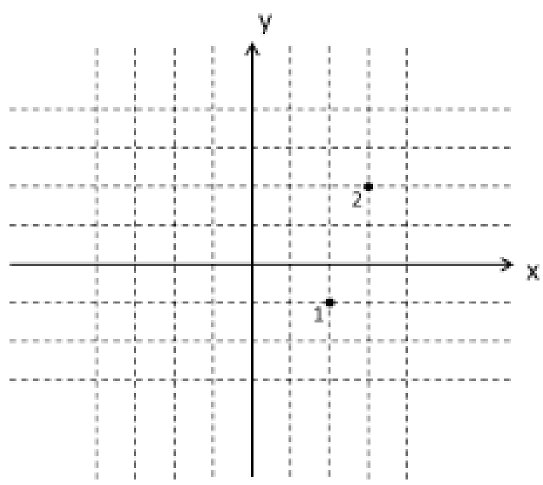


Figura 2: Deslocamento da partícula

(a) 5
b) 7
c) 9
d) 11
e) 13

Resolução

De acordo com o enunciado, a partícula está sujeita a uma força constante $\vec{\boldsymbol{F}}$. Sabemos que o trabalho realizado por uma força constante ao longo de um deslocamento entre dois pontos é:

$$W = \vec{\boldsymbol{F}} \cdot \Delta\vec{\boldsymbol{r}}, \tag{17}$$

onde $\Delta\vec{\boldsymbol{r}}$ representa o vetor deslocamento entre os dois pontos e "$\cdot$" expressa o produto escalar entre os dois vetores. Como a expressão para a força já foi fornecida pelo enunciado, resta apenas identificarmos o vetor $\Delta\vec{\boldsymbol{r}}$. Observe que o ponto 2 está a um espaçamento de grade de distância na horizontal em relação ao ponto 1, e três espaçamentos de grade na vertical. Assim, o vetor deslocamento será:

$$\Delta\vec{\boldsymbol{r}} = \hat{\boldsymbol{i}} + 3\hat{\boldsymbol{j}}, \tag{18}$$

onde as unidades de cada componente são dadas em metros.

Agora, calculamos o produto escalar:

$$\vec{\boldsymbol{F}} \cdot \Delta\vec{\boldsymbol{r}} = (2\hat{i} + \hat{j}) \cdot (\hat{i} + 3\hat{j})\,\mathrm{Nm} \tag{19}$$

Utilizando a propriedade distributiva do produto escalar, encontramos:

$$(2\hat{\boldsymbol{i}} + \hat{\boldsymbol{j}}) \cdot (\hat{\boldsymbol{i}} + 3\hat{\boldsymbol{j}}) \;=\Big[2(\hat{\boldsymbol{i}} \cdot \hat{\boldsymbol{i}}) + 6(\hat{\boldsymbol{i}} \cdot \hat{\boldsymbol{j}}) + (\hat{\boldsymbol{j}} \cdot \hat{\boldsymbol{i}}) + 3(\hat{\boldsymbol{j}} \cdot \hat{\boldsymbol{j}})\Big] \tag{20}$$

Além disso, como $\hat{\boldsymbol{i}}$ e $\hat{\boldsymbol{j}}$ são vetores unitários e são perpendiculares entre si, temos $\hat{\boldsymbol{i}} \cdot \hat{\boldsymbol{i}} = \hat{\boldsymbol{j}} \cdot \hat{\boldsymbol{j}} = 1$ e $\hat{\boldsymbol{i}} \cdot \hat{\boldsymbol{j}} = \hat{\boldsymbol{j}} \cdot \hat{\boldsymbol{i}} = 0$. Portanto:

$$W = \vec{\boldsymbol{F}} \cdot \Delta\vec{\boldsymbol{r}} = (2+3)\,\mathrm{Nm} = 5\ \mathrm{J} \tag{21}$$

Perceba que identificamos a unidade Nm com a unidade J (joule) para energia.

RESPOSTA: Alternativa A

■

8. Um mol de gás ideal à temperatura T é resfriado através de uma transformação isocórica de volume V_1 até a pressão P cair para $P/2$ e cede uma quantidade de calor Q_1. Depois, através de um processo isobárico, o gás é levado a um estado final de volume V_2 de temperatura $T_2 = T$, ou seja, o estado final tem a mesma temperatura que o estado inicial. Seja Q_2 o calor trocado pela gás no processo 2, podemos afirmar que:

   a) $V_2 < V_1$ e $|Q_2| = |Q_1|$
   b) $V_2 = V_1$ e $|Q_2| = |Q_1|$
   c) $V_2 > V_1$ e $|Q_2| = |Q_1|$
   d) $V_2 > V_1$ e $|Q_2| > |Q_1|$
   e) $V_2 > V_1$ e $|Q_2| < |Q_1|$

Resolução

Como foi dito pelo enunciado que se trata de um gás ideal, podemos utilizar a equação de estado (10), mostrada na Questão 3. Além disso, vamos considerar um mol de gás, de forma que $n = 1$.

Vamos analisar cada transformação separadamente:

1) A primeira transformação é isocórica, ou seja, seu volume V_1 não varia. Para calcularmos o calor cedido Q_1, podemos utilizar a equação:

$$Q = nC_V\Delta T, \tag{22}$$

onde C_V é o calor específico molar a volume constante e ΔT é a variação de temperatura sofrida pelo gás no processo.
Isolando T na equação dos gases ideais (e considerando $n = 1$) para o estado inicial do gás, encontramos:

$$T = \frac{PV_1}{R} \tag{23}$$

e fazendo o mesmo para o estado do gás após a transformação, quando a pressão cai para $P/2$, encontramos:

$$T_f = \frac{(P/2)V_1}{R} = \frac{T}{2} \tag{24}$$

ou seja, a temperatura do gás cai pela metade após a primeira transformação.
Substituindo esses resultados na Eq. acima, encontramos:

$$\begin{aligned} Q_1 &= C_V\Delta T \\ &= C_V\left(\frac{PV_1}{2R} - \frac{PV_1}{R}\right) \\ &= -\frac{C_V PV_1}{2R} \end{aligned} \tag{25}$$

Observe que o calor é negativo, o que indica que ele foi cedido pelo sistema, como esperado.

2) A segunda transformação é isobárica, ou seja, a pressão do gás é mantida no valor $P/2$ constante. Utilizando mais uma vez a equação dos gases ideais e utilizando o fato que o gás retorna a temperatura inicial T ao fim do processo, podemos encontrar o seu volume final V_2:

$$T = \frac{(P/2)V_2}{R} \tag{26}$$

Comparando com a Eq. 23, concluímos imediatamente que $V_2 = 2V_1$, ou seja, o gás dobra de volume ao final do processo.

Para calcularmos o calor Q_2, devemos levar em conta que a transformação é isobárica, de forma que a equação apropriada torna-se:

$$Q = nC_p \Delta T \tag{27}$$

onde C_P é o calor específico molar à pressão constante. Substituindo os valores encontramos para as temperaturas inicial ($T/2$) e final (T) da transformação (e considerando mais uma vez $n = 1$), encontramos:

$$Q_2 = C_P \left(\frac{PV_1}{R} - \frac{PV_1}{2R} \right) = \frac{C_P PV_1}{2R}. \tag{28}$$

Observe que $Q_2 > 0$, o que indica que o calor é fornecido ao sistema, como esperado.

Finalmente, sabemos que os calores específicos a volume e pressão constantes estão relacionados pela equação:

$$C_P = C_V + R \tag{29}$$

Portanto, devemos ter $C_P > C_V$ uma vez que R é uma quantidade positiva. Comparando as expressões de Q_1 e Q_2 e utilizando o resultado acima, concluímos que $|Q_2| > |Q_1|$.

RESPOSTA: Alternativa D

■

9. Quando dois corpos de diferentes temperaturas estão em contato térmico, há trocas de calor até que o equilíbrio térmico seja estabelecido. Determine a temperatura de equilíbrio $\mathrm{T_e}$ quando 5 kg de água à temperatura de 10°C são adicionados a 10 kg de água a 40°C. Despreze a capacidade térmica do recipiente e as perdas de calor. O valor mais próximo de $\mathrm{T_e}$, em °C, é

a) 20
b) 25
c) 30
d) 33
e) 35

Resolução

A quantidade de calor sensível recebida ou transferida por um corpo é dada por

$$Q = mc\Delta T \tag{30}$$

onde m é a massa do corpo, c o seu calor específico e ΔT a variação de temperatura sofrida por ele.

Ao desprezarmos a capacidade térmica do recipiente e as perdas de calor, o sistema formado pelas duas massas de água constitui um sistema termodinamicamente fechado. Nesse caso, a soma das quantidades de calor trocadas entre as duas massas deve ser nula, ou seja,

$$\sum_i Q_i = 0 \tag{31}$$

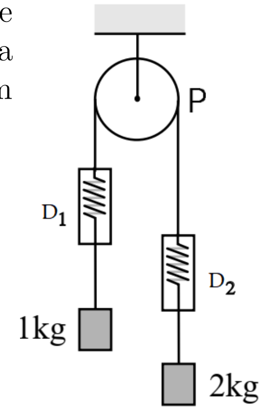
Portanto, sabendo que o calor específico da água líquida (fornecida no cabeçalho) é $c = 1{,}0$ cal g^{-1} °C^{-1}, devemos ter:

$$\begin{aligned}
5\ \text{kg} \cdot \cancel{1{,}0\ \text{cal g}^{-1}\ {}^\circ\text{C}^{-1}} \cdot (T_e - 10\ {}^\circ\text{C}) + 10\ \text{kg} \cdot \cancel{1{,}0\ \text{cal g}^{-1}\ {}^\circ\text{C}^{-1}} \cdot (T_e - 40\ {}^\circ\text{C}) &= 0 \\
T_e - 10\ {}^\circ\text{C} &= -\frac{10}{5}(T_e - 40\ {}^\circ\text{C}) \\
3T_e &= 90\ {}^\circ\text{C} \\
T_e &= 30\ {}^\circ\text{C}
\end{aligned} \tag{32}$$

RESPOSTA: Alternativa C

■

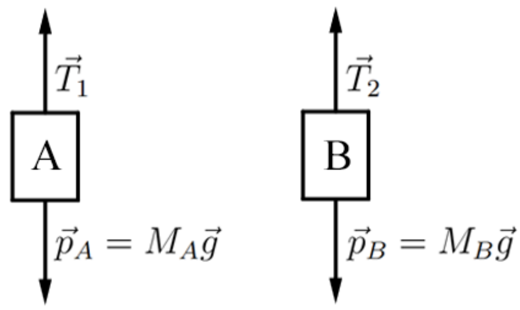
10. Na máquina de Atwood representada na figura, a polia P, o fio inextensível e os dinanômetros D_1 e D_2 têm massa desprezível. Se o sistema é liberado para se mover, com atrito desprezível, as indicações nos dinanômetros serão (em N), respectivamente



a) 10/3 e 20/3
b) 40/3 e 40/3
c) 20/3 e 40/3
d) 20/3 e 20/3
e) 10 e 20

Resolução

Inicialmente, é útil construir um diagrama das forças que atuam em cada caixa, denotando as caixas de 1kg e 2kg como A e B, respectivamente:



Cada caixa sofre ação da força peso $\vec{p}$, que corresponde ao produto da massa da caixa pela aceleração gravitacional, além da tração $\vec{T}$ exercida pelo fio. Como o movimento das duas caixas ocorre verticalmente, analisaremos as forças que são aplicadas aos corpos ao longo da direção vertical. Utilizando a segunda lei de Newton, $\Sigma\vec{F} = M\vec{a}$, podemos escrever as equações para cada caixa:

$$T_1 - M_A\ g = M_A\ a_A \tag{33}$$
$$M_B\ g - T_2 = M_B\ a_B \tag{34}$$

Note que, na primeira equação, assumimos que o bloco A se desloca para cima. Já na segunda, assumimos que o bloco B se desloca para baixo, de forma que a_A e a_B devem ser positivos. Tal hipótese vem do dado do problema, $M_B > M_A$.

De acordo com o enunciado, como o fio e o dinamômetro são ideais, teremos $T_1 = T_2 = T$. Pela mesma razão, as caixas se moverão com mesmo módulo de aceleração, isto é, $a_1 = a_2 = a$. Assim, temos um sistema de duas equações com variáveis alvo a e T:

$$\begin{cases} T - M_A\ g = M_A\ a \\ M_B\ g - T = M_2\ a \end{cases} \tag{35}$$

Somando as duas equações, temos:

$$M_B\ g - M_A\ g = M_A\ a + M_B\ a$$
$$(M_B - M_A)g = (M_A + M_B)a$$
$$a = \frac{(M_B - M_A)g}{M_A + M_B} \tag{36}$$

Como já sabemos os valores de M_A, M_B e g, podemos substitui-los diretamente na equação (36) e encontrar o módulo de aceleração dos dois blocos:

$$a = \frac{(2\text{kg} - 1\text{kg}) \times 10\text{m/s}^2}{1\text{kg} + 2\text{kg}} = \frac{1\text{kg} \times 10\text{m/s}^2}{3\text{kg}} = \frac{10}{3}\text{m/s}^2$$

A tensão do fio aplicará uma força de mesmo módulo em cada diamômetro, que então indicará este valor. Conhecendo a aceleração, podemos usar uma das equações do sistema (35) para calcular a tração do fio:

$$T = M_A\ a + M_A\ g = 1\text{kg} \times \frac{10}{3}\text{m/s}^2 + 1\text{kg} \times 10\text{m/s}^2 = \frac{40}{3}\text{kg} \times \text{m/s}^2 = \frac{40}{3}\text{N}$$

Portanto, ambos os diamômetros indicarão o valor de $\frac{40}{3}$N.

RESPOSTA: Alternativa B

■

11. Uma bola A, de massa 0,1 kg, é lançada para o alto verticalmente com uma velocidade de 5 m/s, de um ponto no nível do solo. Simultaneamente, outra bola B, de massa 0,2 kg é lançada, do mesmo ponto, com velocidade de 10 m/s sob um ângulo de 30° com a horizontal. Desprezando a resistência do ar, podemos afirmar que

    a) A atinge uma altura maior que B.
    b) B atinge uma altura maior que A.
    c) A e B caem no solo simultâneamente.
    d) A permanece em movimento por mais tempo que B.
    e) Quando tocam o solo, a energia cinética de B é 4 vezes a de A.

    Resolução

    Vamos adotar um sistema de eixos cartesianos com eixo X ao longo da direção horizontal, apontando para a direita, e eixo Y ao longo da vertical, apontando para cima. A origem é posicionada sobre o ponto de lançamento comum.

    Sabemos que, no ponto mais alto de cada trajetória, a componente vertical da velocidade de cada corpo deve ser nula, de forma que $v_y = 0$. Isso ocorre porque, neste ponto, o corpo inverterá o sentido de seu movimento vertical. Levando em conta ainda que o movimento vertical é um movimento de aceleração constante dada por $a_y = -g$, podemos usar a equação de Torricelli para descobrir a altura máxima alcançada por cada corpo:

    $$v_y^2 = v_{0y}^2 - 2gH_{max} \quad \rightarrow \quad H_{max} = \frac{v_{0y}^2}{2g} \tag{37}$$

    onde v_{0y} é o valor inicial da componente vertical da velocidade de cada corpo.

    No caso de A, como o lançamento é vertical, encontramos diretamente que $v_{0y}^A = v_0^A = 5$ m/s. No caso de B, teremos $v_{0y}^B = v_0^B \text{sen}(30°) = 10 \text{ m/s} \cdot 1/2 = 5$ m/s. Portanto, como $v_{0y}^A = v_{0y}^B$, concluímos a partir do resultado acima que as alturas máximas alcançadas por A e B devem ser iguais.

    Vamos agora calcular o tempo total de movimento utilizando a equação horária da velocidade para o movimento vertical. Sabemos que, para um instante genérico:

    $$v_y(t) = v_{0y} - gt \tag{38}$$

    Além disso, como o movimento é simétrico em relação ao ponto onde a altura é máxima, sabemos que ao final do movimento, no instante t_f devemos ter $v_y(t_f) = -v_{0y}$. Assim:

    $$\begin{aligned} -v_{0y} &= v_{0y} - gt_f \\ gt_f &= 2v_{0y} \\ t_f &= \frac{v_{0y}}{g} \end{aligned} \tag{39}$$

    Como já vimos acima, os valores de v_{0y} são iguais para A e B, de forma que o tempo total de movimento deve ser o mesmo para os dois corpos. Com isso, já sabemos que a alternativa correta deve ser a C, mas vamos analisar a última situação proposta.

    A energia cinética de um corpo de massa m e velocidade escalar v é dada pela expressão

    $$K = \frac{mv^2}{2} \tag{40}$$

    Explorando novamente a simetria do problema, sabemos que, quando os corpos tocam o solo, suas velocidades devem ter o mesmo módulo que no instante inicial. Portanto, teremos $v_A = 5$ m/s e $v_B = 10$ m/s, ou seja, $v_B = 2v_A$. Além disso, o enunciado nos informa que $m_A = 0{,}1$ kg e $m_B = 0{,}2$ kg, de forma que $m_B = 2m_A$. Reunindo essas informações, podemos escrever a energia cinética final de B como

    $$K_B = \frac{m_B v_B^2}{2} = \frac{2m_A(2v_A)^2}{2} = 8 \times \frac{m_A v_A^2}{2} = 8K_A \tag{41}$$

    Portanto, no instante em que tocam o solo, a energia cinética de B é 8 vezes a de A.

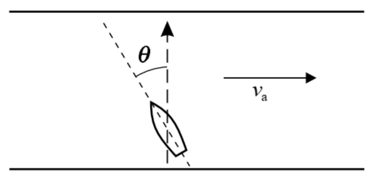
    RESPOSTA: Alternativa C

    ■

12. **QUESTÃO ANULADA**

    ■

13. Um barco se move com uma velocidade de 10km/h em relação à água de um rio que flui a 5km/h. O barco pretende atravessar o rio em uma trajetória retilínea perpendicular às margens do rio (ver linha tracejada com a seta na figura abaixo).



O ângulo θ segundo o qual deve ser orientado o barco e sua velocidade em relação às margens são, respectivamente,

a) 0 e 10km/h
b) 60 e 8,7km/h
c) 30 e 11,2km/h
d) 30 e 8,7km/h
e) 60 e 11,2km/h

Resolução

Para calcularmos a velocidade do barco em relação às margens do rio, é conveniente decompormos o vetor velocidade do barco em relação à água, $\vec{v}_b$, em componentes horizontal e vertical. Considerando um sistema de coordenadas cartesianas com eixo X positivo orientado para a esquerda e eixo Y positivo orientado para cima, podemos escrever as componentes como:

$$v_{bx} = |\vec{v}_b| \operatorname{sen} \theta \tag{42}$$
$$v_{by} = |\vec{v}_b| \cos \theta \tag{43}$$

Para que o barco percorra uma trajetória retilínea e perpendicular às margens do rio, a componente horizontal da sua velocidade em relação à água deve ter o mesmo módulo e sentido oposto à velocidade da correnteza, de modo que a soma dessas componentes resulte em zero. Assim,

$$\begin{aligned} v_{bx} + v_a &= 0 \\ v_{bx} &= -v_a \\ v_{bx} &= -(-5\text{km/h}) \\ v_{bx} &= 5\text{km/h} \end{aligned}$$

Conhecendo o resultado acima e utilizando $v_b = 10$ km/h como informado no enunciado, podemos encontrar o ângulo θ pela equação (42):

$$\begin{aligned} 5\text{km/h} &= 10\text{km/h} \times \operatorname{sen} \theta \\ \frac{1}{2} &= \operatorname{sen} \theta \\ \theta &= \operatorname{arcsen} \left(\frac{1}{2}\right) \\ \theta &= 30^\circ \end{aligned}$$

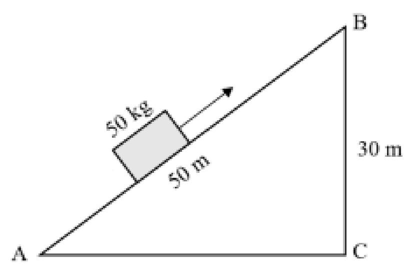
Como a velocidade da água em relação à margem do rio é horizontal, a componente vertical da velocidade do barco em relação à água, v_{by}, representa diretamente a velocidade do barco em relação à margem. Usando a equação (43), temos:

$$\begin{aligned} v_{by} &= 10\text{km/h} \times \cos 30^\circ \\ v_{by} &\approx 10\text{km/h} \times 0{,}87 \\ v_{by} &\approx 8{,}7\text{km/h} \end{aligned}$$

RESPOSTA: Alternativa D

■

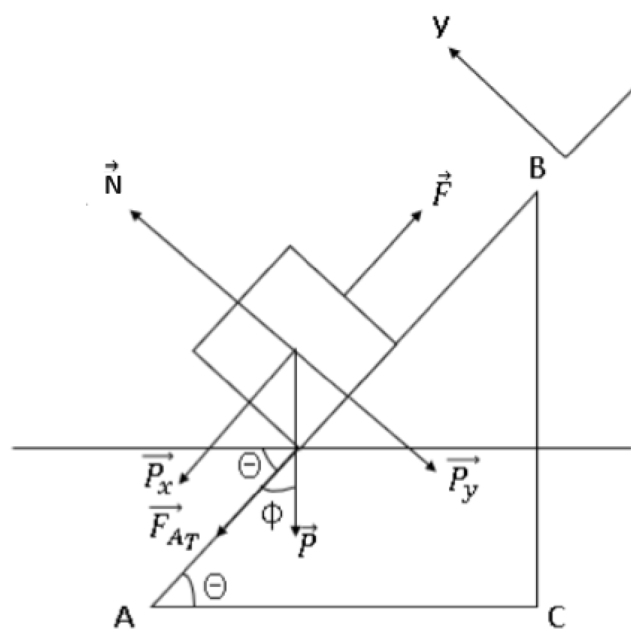
14. A figura mostra um plano inclinado sobre o qual se move um corpo com velocidade constante do ponto A ao ponto B. O coeficiente de atrito cinético entre o plano e o corpo é 0,4, e o corpo se move para cima graças a uma força $\vec{F}$ não representada na figura. Qual das alternativas abaixo mostra o valor do trabalho realizado pela força $\vec{F}$ (em kJ) ao longo desse percurso?



(a) 10
(b) 15
(c) 23
(d) 25
(e) 28

Resolução

Vamos chamar o ângulo CÂB de θ. Escolhemos, de forma inteligente, a orientação dos eixos coordenados de forma que o eixo X seja paralelo à rampa e aponte para cima. O diagrama de corpo livre é mostrado na figura abaixo. As forças que atuam sobre o corpo são a força peso $\vec{\boldsymbol{P}}$, cujas projeções ao longo dos



eixos coordenados são $\vec{\boldsymbol{P}}_x$ e $\vec{\boldsymbol{P}}_y$, a força de atrito $\vec{\boldsymbol{F}}_{at}$, a força normal $\vec{\boldsymbol{N}}$ e a força $\vec{\boldsymbol{F}}$ que puxa o corpo, que vamos assumir que atua paralelamente ao plano.

Vamos calcular as projeções do peso utilizando o ângulo ϕ indicado na figura. Observando a reta traçada paralela ao segmento $\overline{AC}$, vemos que o ângulo entre ela e o plano inclinado é θ, pois esses ângulos são alternos internos. Assim, como θ e ϕ são complementares, o seno de um é o cosseno do outro e vice versa. Portanto, os módulos das projeções dos pesos serão:

$$P_x = mg\ \cos(\phi) = mg\ \text{sen}(\theta)$$
$$P_y = mg\ \text{sen}(\phi) = mg\ \cos(\theta) \tag{44}$$

onde m é a massa do corpo.

Agora, considerando que o bloco não se desloca perpendicularmente ao plano, podemos aplicar a primeira lei de Newton e impor que a componente y da força resultante é zero. Com isso, obtemos:

$$N - P_y = 0$$
$$P_y = N \tag{45}$$

Para o eixo x, como o enunciado informa que a velocidade do bloco é constante, a componente x da força resultante também deve ser zero. Assim, podemos escrever:

$$
\begin{aligned}
F - F_{at} - P_x &= 0 \\
F &= F_{at} + P_x
\end{aligned}
\tag{46}
$$

onde F é o módulo da força aplicada. Agora, como o atrito é cinético, podemos utilizar a relação $F_{at} = \mu N$, onde μ é o coeficiente de atrito cinético. Além disso, utilizando as dimensões do plano informadas na figura, concluímos rapidamente que $\text{sen}(\theta) = 3/5$ e $\cos(\theta) = 4/5$. Substituindo essas relações nas Eqs. acima, encontramos:

$$
\begin{aligned}
F &= \mu N + P_x \\
&= \mu\, mg \cos(\theta) + mg\, \text{sen}(\theta) \\
&= 0{,}4 \times 500\text{N} \cdot \frac{4}{5} + 500\text{N}\, \frac{3}{5} = 460\text{N}
\end{aligned}
\tag{47}
$$

onde utilizamos a massa informada no enunciado e $g = 10$ m/s^2.

Finalmente, como a força $\vec{\boldsymbol{F}}$ é constante e atua no mesmo sentido do deslocamento do corpo, podemos escrever o trabalho realizado por ela no deslocamento do ponto A ao ponto B (com a distância de A até B sendo Δx=50 m) como:

$$
W = F \cdot \Delta x = 460\text{N} \cdot 50\text{m} = 23\text{kJ}
\tag{48}
$$

onde utilizamos que 1kJ = 1000J = 1000N.m.

OBS: Essa questão também poderia ser resolvida utilizando o teorema do trabalho - energia cinética, que diz que a soma de todos os trabalhos feitos em um objeto é igual à sua variação de energia cinética. Como a velocidade do corpo é constante, essa variação deve ser zero. Assim, poderíamos calcular o trabalho que cada força faz individualmente no trajeto de A até B e expressar o trabalho realizado por $\vec{\boldsymbol{F}}$ em termos deles. No entanto, para calcular o trabalho realizado pela força de atrito, ainda precisaríamos utilizar a condição de equilíbrio no eixo Y e a relação $F_{at} = \mu N$, como feito acima.

RESPOSTA: Alternativa C

■

15. Na Terra, uma mola de massa desprezível está presa ao teto e sustenta em sua outra extremidade um corpo massivo. Na situação de equilíbrio estático, a mola se alonga de um comprimento L. Quando o sistema é perturbado, ele oscila com frequência f. Quando a mesma experiência é feita na Lua, com um corpo e mola de mesmas características, observa-se que o alongamento da mola na situação de equilíbrio é $L' = L/n$ e a frequência de oscilação do sistema é f'. Qual das alternativas abaixo representa a razão entre as frequências f/f'?

a) n
b) $n^{1/2}$
c) 1
d) $\frac{1}{n^{1/2}}$
e) $1/n$

Resolução

A frequência de oscilação de um sistema massa-mola na vertical está relacionada à constante elástica k da mola e a massa M do objeto pendurado a ela, pela fórmula:

$$
f = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k}{M}}
\tag{49}
$$

Além disso, o alongamento x da mola na configuração de equilíbrio está relacionado à ação da força peso sobre o corpo. Utilizando a lei de Hooke para escrever a força que a mola exerce sobre o corpo e aplicando a primeira lei de Newton à situação de equilíbrio, temos:

$$
\begin{aligned}
F_{el} + P &= 0 \\
kx - Mg &= 0
\end{aligned}
\tag{50}
$$

onde g é a aceleração da gravidade local.

Se chamarmos de g_T a aceleração da gravidade na Terra e g_L o valor na Lua, podemos utilizar a equação acima para obter os alongamentos da mola nas duas situações:

$$\begin{cases} kL = Mg_T \\ kL' = Mg_L \end{cases} \tag{51}$$

onde utilizamos o fato de que o corpo e a mola são os mesmos nas duas situações, de forma que os valores de k e M são os mesmos.

Dividindo a primeira equação pela segunda e substituindo $L' = L/n$, podemos relacionar n com a razão entre as acelerações da gravidade em cada situação:

$$\begin{aligned} \frac{L}{L'} &= \frac{g_T}{g_L} \\ \frac{L}{L/n} &= \frac{g_T}{g_L} \\ n &= \frac{g_T}{g_L} \end{aligned} \tag{52}$$

O resultado acima indica que $n > 1$ uma vez que $g_T > g_L$. Portanto, o alongamento da mola na Lua é menor que o valor correspondente na Terra.

Por outro lado, observando a Eq. 49, notamos que a frequência de oscilação depende apenas de k e M. Já vimos que esses valores são os mesmos nas duas situações, de forma que $f = f'$ e:

$$\frac{f}{f'} = 1 \tag{53}$$

RESPOSTA: Alternativa C

■

16. Um mosquito, que voava na rodovia, bate no para-brisa de um caminhão e permanece esmagado lá. Indiquemos com Δp_c e F_c o módulo da mudança de momento do caminhão e a força média aplicada pelo caminhão ao mosquito e, da mesma forma, com Δp_m e F_m o módulo da variação do momento do mosquito e a força média aplicada pelo mosquito ao caminhão. Qual, dos ítens abaixo, é o correto?

a) $F_c > F_m$ e $\Delta p_c < \Delta p_m$
b) $F_c > F_m$ e $\Delta p_c > \Delta p_m$
c) $F_c > F_m$ e $\Delta p_c = \Delta p_m$
d) $F_c = F_m$ e $\Delta p_c > \Delta p_m$
e) $F_c = F_m$ e $\Delta p_c = \Delta p_m$

Resolução

Como a colisão ocorre durante um intervalo de tempo muito pequeno em comparação ao intervalo de movimento típico do caminhão, podemos considerar que o sistema composto pelo mosquito e pelo caminhão é um sistema isolado. Nessa situação, a ação da força externa resultante sobre o sistema é desprezível e o momento linear total do sistema deve se conservar.

Portanto, o momento linear total do sistema antes da colisão é igual ao momento linear após a colisão:

$$\vec{\boldsymbol{p}}_1 = \vec{\boldsymbol{p}}_2 \tag{54}$$

Escrevendo $\vec{\boldsymbol{p}}_1 = \vec{\boldsymbol{p}}_{1c} + \vec{\boldsymbol{p}}_{1m}$ e $\vec{\boldsymbol{p}}_2 = \vec{\boldsymbol{p}}_{2c} + \vec{\boldsymbol{p}}_{2m}$, encontramos:

$$\begin{aligned} \vec{\boldsymbol{p}}_{1c} + \vec{\boldsymbol{p}}_{1m} &= \vec{\boldsymbol{p}}_{2c} + \vec{\boldsymbol{p}}_{2m} \\ \vec{\boldsymbol{p}}_{1_c} - \vec{\boldsymbol{p}}_{2c} &= \vec{\boldsymbol{p}}_{2m} - \vec{\boldsymbol{p}}_{1m} \\ -\Delta\vec{\boldsymbol{p}}_c &= \Delta\vec{\boldsymbol{p}}_m \end{aligned} \tag{55}$$

onde $\Delta\vec{\boldsymbol{p}}_i = \vec{\boldsymbol{p}}_{2i} - \vec{\boldsymbol{p}}_{1i}$ indica a variação de momento sofrida por cada corpo após a colisão. Vemos então que, claramente, as variações de momento têm o mesmo módulo, ou seja, $\Delta p_c = \Delta p_m$.

Além disso, note que a força que o mosquito exerce sobre o caminhão durante a colisão, $\vec{\boldsymbol{F}}_{MC}$, e a força que o caminhão exerce sobre o mosquito, $\vec{\boldsymbol{F}}_{CM}$, constituem um par ação-reação e são forças internas ao sistema. Elas devem obedecer à terceira lei de Newton, que afirma que para toda força que um corpo exerce sobre o outro, existe uma força de igual magnitude, mas sentido oposto, que é exercida pelo segundo sobre o primeiro corpo. Assim,

$$\vec{\boldsymbol{F}}_{CM} = -\vec{\boldsymbol{F}}_{MC} \tag{56}$$

Concluímos então que as forças também possuem o mesmo módulo, ou seja,

$$F_c = F_m \tag{57}$$

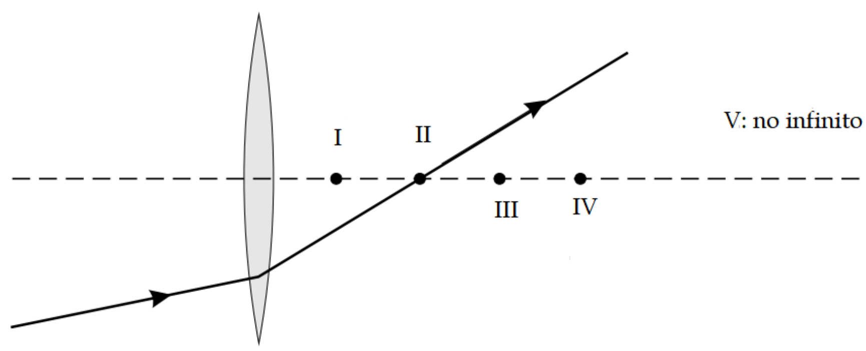
O mesmo valerá para os valores médios.

OBS: Note ainda que o mesmo resultado poderia ser obtido a partir da Eq. 55, notando que a força média pode ser expressa por $F_c = \Delta p_m/\Delta t$, onde Δt é a duração da colisão.

RESPOSTA: Alternativa E

■

17. A figura mostra um raio de luz que incide e é refratado por uma lente delgada convergente.

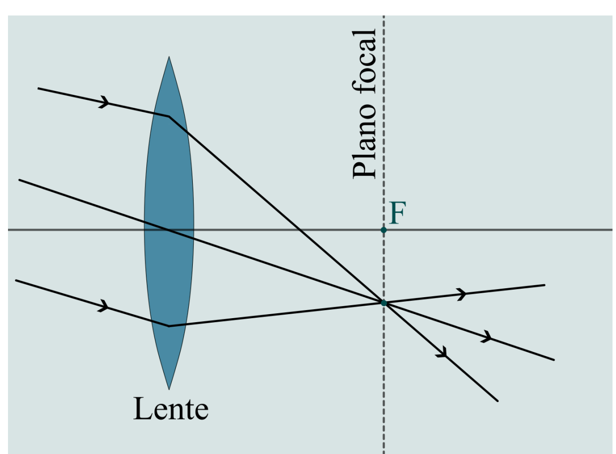


Qual dos pontos indicados representa melhor a posição do foco da lente?

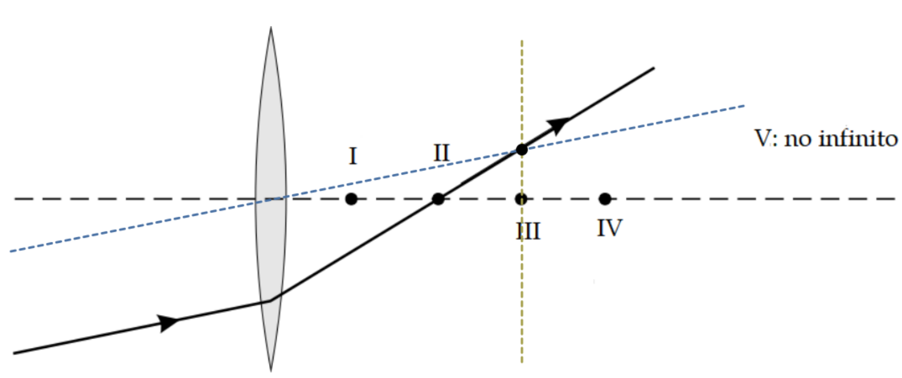
a) I
b) II
c) III
d) IV
e) V

Resolução

Para respondermos a essa questão, é útil construirmos a figura auxiliar mostrada abaixo. Nela, desenhamos o plano focal da lente, definido como o plano perpendicular ao seu eixo principal e que contém o foco, denotado pelo ponto F na figura. Observe ainda a propriedade de que um feixe de raios paralelos deve convergir em algum ponto do plano focal, como mostrado na figura. Um caso particular é o de raios paralelos ao eixo principal, que convergem exatamente em F.



Podemos então nos valer dessa propriedade e retornar à situação original do problema, como mostra a figura abaixo. Traçando um raio incidente paralelo ao raio original e passando pelo centro da lente, notamos que tal raio passa sem desvio para o outro lado. O cruzamento entre este raio e o raio refratado original define o ponto de convergência no plano focal. Por fim, a projeção deste ponto sobre o eixo define a posição do foco, como indicado.



Portanto, a posição do foco da lente é mais próxima ao ponto III.

RESPOSTA: Alternativa C

■

18. Um satélite se move em uma órbita circular em torno da Terra. Considere as seguintes afirmações feitas por um observador que analisa o movimento a partir de um referencial inercial.

I : Na direção radial, a única força que atua no satélite é a força gravitacional centrípeta.

II : Na direção radial, além da força gravitacional centrípeta também atua uma força centrífuga.

III : É necessário um motor para sustentar o movimento do satélite na direção tangencial.

São corretas as alternativas:

(a) Apenas I.

(b) Apenas II.

(c) Apenas III.

(d) I e III.

(e) II e IV.

Resolução

Vamos analisar cada afirmativa:

I CORRETO. De fato, podemos considerar que a força gravitacional que a Terra exerce sobre o satélite é a única força que atua sobre ele. Além disso, sabemos que essa força aponta em direção ao centro da Terra e, portanto, faz exatamente o papel de uma resultante centrípeta.

II ERRADO. Como discutimos acima, a força gravitacional é a única força que atua sobre o satélite. No entanto, é importante ressaltar que estamos analisando o problema do ponto de vista de um referencial inercial. Por exemplo, se estivéssemos analisando o mesmo problema do ponto de vista de um observador atrelado ao satélite, este estaria em repouso e seria a Terra que estaria girando em torno dele. Assim, deve haver uma força contrária à gravitacional atuando sobre o satélite, conhecida como força centrífuga, que cancela a ação da força gravitacional a cada instante. Tal força não se origina de uma interação real entre a Terra e o satélite, mas sim do fato deste referencial estar em movimento acelerado com relação a um referencial e inercial e constituir, portanto, um referencial não-inercial. Por essa razão, tais forças são conhecidas como forças não-inerciais ou pseudo-forças.

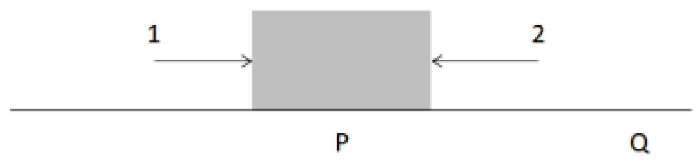
III ERRADO. Como discutimos acima, a trajetória circular é sustentada pela força gravitacional, que atua como resultante centrípeta. Para uma trajetória circular, não há forças na direção tangencial e, portanto, a velocidade escalar do satélite não é alterada durante o movimento. Sendo assim, não é necessária a ação de um motor para sustentar o movimento.

OBS: De forma mais geral, mesmo no caso de uma órbita elíptica também não seria necessária a ação de um motor. Tal fato vem da força gravitacional ser uma força central e, portanto, conservativa. A energia mecânica do sistema será conservada sem a necessidade da ação de um motor para sustentar o movimento. Note, no entanto, que a velocidade escalar do satélite mudaria a medida que a distância entre a Terra e ele variasse.

RESPOSTA: Alternativa A

■

19. Um bloco em repouso no ponto P é empurrado por duas pessoas em sentidos opostos. O bloco se move até o ponto Q, ficando em repouso novamente (ver figura). Na comparação dos trabalhos feitos pelas pessoas (1 e 2) durante o deslocamento do bloco podemos dizer que:



(a) $|W_1| = |W_2| \neq 0$

(b) $|W_1| > |W_2|$

(c) $|W_1| < |W_2|$

(d) $W_1 = W_2 = 0$

(e) $|W_1| \neq 0$ e $W_2 = 0$

Resolução

Para resolver essa questão, vamos recorrer ao teorema trabalho-energia cinética:

$$\sum_i W_i = \Delta K \tag{58}$$

ou seja, a soma de todos os trabalhos realizados pelas forças que atuam sobre o bloco é igual à variação de sua energia cinética. Como o bloco começa em repouso em P, e acaba em repouso em Q, devemos ter $\Delta K = 0$. Além disso, sabemos que as forças peso e normal que atuam sobre o bloco não devem realizar trabalho no deslocamento de P a Q, uma vez que elas atuam perpendicularmente ao deslocamento. Portanto, teremos:

$$W_1 = -W_2 \tag{59}$$

onde W_1 e W_2 são os trabalhos realizados pelas forças aplicadas pelas pessoas 1 e 2, respectivamente.

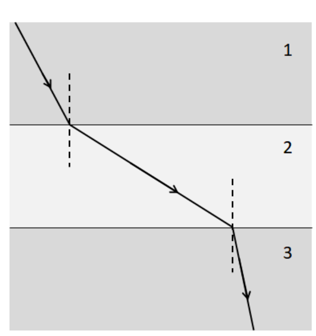
Como há deslocamento, os trabalhos não podem valer zero. Portanto, concluímos que seus módulos são iguais e diferentes de zero.

OBS: Note que as intensidades das forças aplicadas pelas pessoas devem variar durante o deslocamento para garantir que o bloco saia do repouso no ponto P e retorne ao repouso em Q.

RESPOSTA: Alternativa A

■

20. A figura mostra esquematicamente um raio de luz que se propaga através da água, ar e vidro, não necessariamente nessa ordem. Sabendo que a luz se propaga mais rápido na água do que no vidro, os três meios, na ordem são:



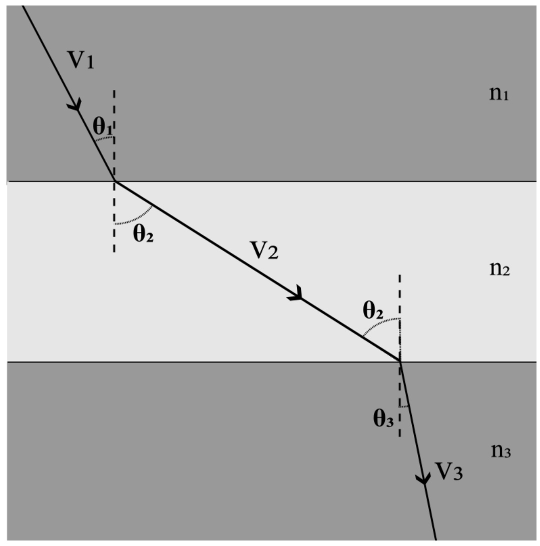
a) 1: ar; 2: água; 3: vidro
b) 1: água; 2: vidro; 3: ar
c) 1: vidro; 2: água; 3: ar
d) 1: vidro; 2: ar; 3: água
e) 1: água; 2: ar; 3: vidro

Resolução

O índice de refração é uma medida que indica a rapidez da luz em um determinado meio material. Ele é dado pela razão entre a velocidade da luz no vácuo c e a velocidade da luz naquele meio v:

$$n = \frac{c}{v} \tag{60}$$

Utilizando a numeração da figura, podemos definir os índices de refração para cada meio, assim como os ângulos de incidência e refração em relação à reta normal, como mostrado abaixo. Observa-se ainda que o ângulo de refração no segundo meio é igual ao de incidência no terceiro.



A lei de Snell-Descartes, também conhecida como lei da refração, diz que:

$$n_a \operatorname{sen} \theta_a = n_b \operatorname{sen} \theta_b \tag{61}$$

Onde θ_a e θ_b são os ângulos de incidência e refração, respectivamente, e n_a e n_b são os índices de refração dos dois meios.

Portanto, para o nosso caso, obtemos:

$$n_1 \operatorname{sen} \theta_1 = n_2 \operatorname{sen} \theta_2 = n_3 \operatorname{sen} \theta_3 \tag{62}$$

Observando a figura, vemos que $\theta_2 > \theta_1 > \theta_3$. Como todos os ângulos são agudos, teremos também que $\operatorname{sen} \theta_2 > \operatorname{sen} \theta_1 > \operatorname{sen} \theta_3$. Assim, para que a equação (62) seja satisfeita, devemos ter:

$$n_2 < n_1 < n_3. \tag{63}$$

Pela equação (60), vemos que a velocidade da luz em um meio é inversamente proporcional ao índice de refração correspondente, ou seja, quanto maior o índice, menor a velocidade. Assim, do resultado acima, concluímos que:

$$v_2 > v_1 > v_3. \tag{64}$$

Agora, o problema nos informa que a velocidade da luz na água é maior que no vidro. Sabemos ainda que a velocidade da luz no ar é aproximadamente igual ao valor no vácuo e que este valor deve ser maior que os valores na água e no vidro. Portanto, da desigualdade acima, concluímos que o meio 2 é o ar, o meio 1 é água e o meio 3 é o vidro. Esquematicamente:

1: água;
2: ar;
3: vidro.

RESPOSTA: Alternativa E

■