UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
Instituto de Física
Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física
Mestrado Profissional em Ensino de Física

MNPEF

GUIA DE EXERCÍCIOS PARA PROFESSORES QUE ABORDAM OS CONCEITOS DE PSEUDOTRABALHO, ENERGIA QUÍMICA E BIOLÓGICA

Leandro Fernandes Batista

Material instrucional associado a dissertação de Mestrado de Leandro Fernandes Batista apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física, Instituto de Física, da Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Orientador(es):
Antônio Carlos Fontes dos Santos
Lúcia Helena Coutinho

Rio de Janeiro
Fevereiro de 2017

1- INTRODUÇÃO

Este guia de exercícios foi elaborado para que os professores de Física do Ensino Médio possam trabalhar através de problemas físicos do cotidiano conceitos como forças internas, pseudotrabalho, energia química e biológica.

Para abordar os conceitos acima selecionamos os seguintes problemas físicos:

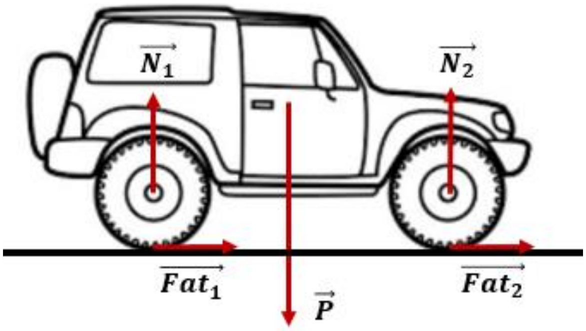
- *Problema 1: Automóvel acelerando sem derrapagem*
- *Problema 2: Colisões inelásticas*
- *Problema 3: Homem de patins empurrando a parede*
- *Problema 4: Uma pessoa pulando*

1.1- Automóvel acelerando sem derrapagem

Considere um automóvel que parte do repouso com tração nas quatro rodas e que se move aceleradamente sobre uma estrada retilínea em que a resistência do ar pode ser desprezada. Determine uma expressão que relacione a velocidade do centro de massa do automóvel em função do deslocamento e em seguida encontre uma expressão que relacione a energia cinética, a energia térmica (ΔU_t), a energia potencial química da bateria (ΔU_B) e o pseudotrabalho.

- **Solução:**

O primeiro passo que é sugerido para tratar do exercício é identificar o automóvel como um sistema de partículas com grau de liberdade. Esta primeira análise nos permite concluir que o Teorema da Energia Cinética não possa ser aplicado. Após identificarmos o automóvel como o sistema, sugerimos fazer o diagrama de forças. A partir do enunciado podemos concluir que as forças que atuam no automóvel são as forças de atrito $\overrightarrow{F_{at_1}}$ e $\overrightarrow{F_{at_2}}$, além da força Peso ($\vec{P}$) e das forças Normais $\overrightarrow{N_1}$ e $\overrightarrow{N_2}$. Estas forças podem ser vistas na figura a seguir:



Como segundo passo na direção de solucionar o problema, note que ao aplicarmos a 2ª Lei de Newton encontraremos que a força resultante do sistema terá intensidade $F_r = 2F_{at_1} + 2F_{at_2}$ mas que as forças de atrito $\overrightarrow{F_{at_1}}$ e $\overrightarrow{F_{at_2}}$ não realizam trabalhos uma vez que o ponto de aplicação das forças não é deslocado (se não ocorrer derrapagens).

Apesar de não podermos aplicar o Teorema da Energia Cinética por se tratar de um sistema, podemos substituí-lo pelo Teorema do Centro de Massa e assim encontraremos uma expressão que relacione a velocidade de translação do centro de massa com a intensidade das forças Atrito. Assim sendo:

$$\tau_{ps} = \Delta\left(\frac{mv_{cm}^2}{2}\right),$$

$$\left(2F_{at_1} + 2F_{at_2}\right).d_{cm} = \Delta\left(\frac{mv_{cm}^2}{2}\right)$$

$$\boxed{v_{cm} = 2\sqrt{\frac{d_{cm}.\left(F_{at_1} + F_{at_2}\right)}{m}}}$$

A partir do que foi demonstrado é importante frisar que como não há trabalho real sendo feito por forças externas a fim de modificar a energia cinética do automóvel, é compreensível que a sua energia de movimento seja decorrente de transformações energéticas que ocorrem devido à engenharia do veículo. Por outro lado, devemos lembrar também que o termo $\Delta\left(\frac{mv_{cm}^2}{2}\right)$ não representa a energia total do sistema, mas somente a parcela referente à energia cinética do centro de massa.

Para encontrar as relações energéticas que ocorrem no sistema e pedidas no enunciado do problema, vamos supor que o automóvel seja elétrico para evitar complicações com entrada e saída de gases no sistema. Feita esta consideração, devemos aplicar a 1ª Lei da Termodinâmica para poder compreender as relações energéticas e evidenciar que seu movimento provém de fatores internos. Logo:

$$Q + \tau = \Delta U,$$

$$Q + 0 = \Delta\left(\frac{mv_{cm}^2}{2}\right) + \Delta E_c^{int} + \Delta U_t + \Delta U_B,$$

$$Q = \left(2F_{at_1} + 2F_{at_2}\right).d_{cm} + \Delta E_c^{int} + \Delta U_t + \Delta U_B,$$

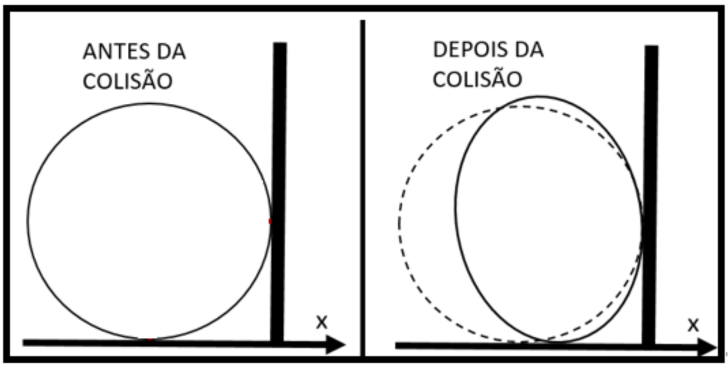
$$Q - \left(2F_{at_1} + 2F_{at_2}\right).d_{cm} = \Delta E_c^{int} + \Delta U_t + \Delta U_B,$$

$$\boxed{Q - \tau_{ps} = \Delta E_c^{int} + \Delta U_t + \Delta U_B}$$

Assim fechamos o exercício e pudemos verificar a importância do uso da 1ª Lei da Termodinâmica e do Teorema do Pseudotrabalho na solução de exercícios.

1.2- Problema 2: Colisões inelásticas

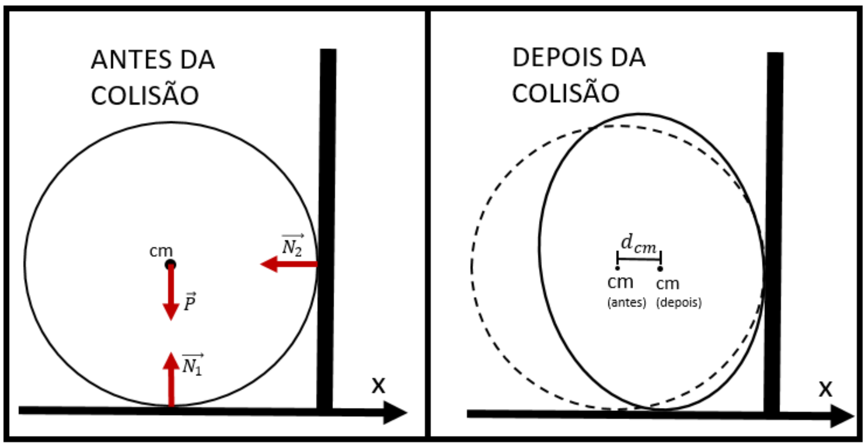
A figura a seguir ilustra uma bola de massa m e velocidade v_0 que se choca inelasticamente com uma parede vertical e adere a ela posteriormente.



A partir do fenômeno reproduzido, encontre uma expressão para medir a força média de impacto entre a bola e a parede sabendo que durante a colisão o centro de massa se deslocou d_{cm}. Explique também, usando a 1ª Lei da Termodinâmica, o que aconteceu com a energia cinética que a bola possuía.

- **Solução:**

Novamente temos um problema envolvendo um sistema (bola). A bola nesse exercício pode ser considerada um sistema deformável e por essa razão não podemos aplicar o Teorema da Energia Cinética. Sugerimos então a identificação das forças e o desenho do diagrama de forças a fim de compreender a física do problema. As forças que atuam na bola durante a colisão são $\vec{P}$, $\overrightarrow{N_1}$ e $\overrightarrow{N_2}$. Essas forças são respectivamente a força Peso, força de contato com solo e a força (média) de contato com a parede durante o choque.



Observe que a partir do diagrama de forças temos que $\vec{P}$ e $\overrightarrow{N_1}$ se anulam e que a força resultante no sistema durante o intervalo de tempo que dura a colisão corresponde a $\overrightarrow{N_2}$ $(F_r = N_2)$. Note que durante o choque o ponto de aplicação da força $\overrightarrow{N_2}$ não realiza deslocamento e como consequência não realiza trabalho.

Embora não haja trabalho realizado por forças externas, a bola ao chocar-se com a parede sofre desaceleração e consequentemente deformação, em virtude da força aplicada pela parede. Logo temos que $\overrightarrow{N_2}$ é a resultante das forças que agem no sistema e poderemos escrever o Teorema do Pseudotrabalho da seguinte maneira:

$$- N_2 . d_{cm} = \Delta E_c^{cm} = \Delta\left(\frac{mv_{cm}^2}{2}\right),$$

$$-N_2 . d_{cm} = \ 0 - \frac{mv_{0\,cm}^2}{2},$$

$$N_2 . d_{cm} = \frac{mv_{0\,cm}^2}{2}.$$

Logo podemos concluir que a força média de impacto da bola com a parede é:

$$\boxed{N_2 = \frac{mv_{0\,cm}^2}{2 . d_{cm}}}$$

Para explicar o que ocorre com a energia cinética do sistema podemos aplicar a 1ª Lei da Termodinâmica de forma a contemplar as particularidades do fenômeno reproduzido. Logo:

$$\Delta U = Q + \tau,$$

$$\Delta E_c^{cm} + \Delta E_c^{int} + \Delta U_t = 0,$$

$$\Delta E_c + \Delta U_t = 0,$$

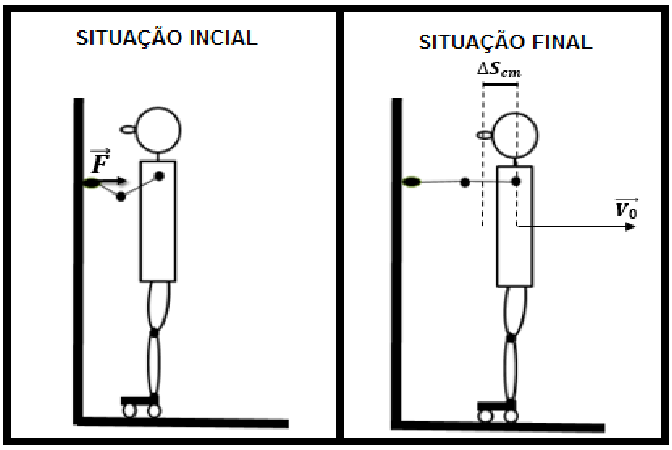
$$\boxed{\Delta E_c = -\,\Delta U_t.}$$

A respeito da demonstração feita anteriormente, percebemos que por consequência de não existir transferência de energia entre as regiões internas e externas, as modificações que ocorrem no sistema decorrem de energias que são de origem interna. Da mesma demonstração concluímos que a energia cinética é em módulo numericamente igual à energia térmica ($|\Delta E_c| = |\Delta U_t|$). O sinal contrário em cada termo da igualdade enfatiza que há transformação entre essas energias. Isso significa que a redução de energia cinética promove o aumento da energia térmica, ou seja, toda a energia de movimento que a bola tinha antes da colisão se converte em energia que irá aumentar a temperatura do sistema.

Por fim, cabe ressaltar que o fenômeno estudado sofre deformações e que por esta razão devemos lembrar que durante o choque existiram trabalhos realizados por forças internas ao sistema, mas que os trabalhos feitos por essas forças internas podem somente converter a energia cinética em energia térmica.

1.3 – Problema 3: Homem de patins empurrando a parede

Considere um homem de massa M com patins inicialmente em repouso que empurra uma parede com força média $\vec{F}$ e que consequentemente desliza para trás, deslocando seu centro de massa um valor ΔS_{cm} e se afastando da parede com velocidade de módulo V_0.



A partir dos dados do enunciado e dos conhecimentos de termodinâmica, encontre uma e expressão que relacione as transformações químicas (energia de Gibbs) com o pseudotrabalho realizado pela força $\vec{F}$.

- **Solução:**

Através da figura podemos verificar que a força de intensidade F não realiza deslocamento e por este motivo não pode realizar trabalho. O fato desta força não realizar trabalho ($\tau_F = 0$) e, por consequência, não poder transmitir energia do meio externo a fim de que o sistema ganhe energia cinética nos permite concluir que a energia cinética máxima que o homem adquire é fruto de transformações energéticas internas. O sistema também não possui características de uma partícula, e sendo assim o Teorema da Energia Cinética não pode ser aplicado de forma satisfatória, tendo que ser substituído pelo Teorema do Centro de Massa. Aplicando o teorema, encontramos a seguinte relação:

$$\tau_{ps} = \Delta E_c^{cm}$$

$$F.\Delta S_{cm} = \frac{Mv_0^2}{2}$$

Note que a equação acima generaliza todas as grandezas físicas que podem ser mensuráveis por agentes externos ao sistema e não aponta as conversões energéticas que ocorrem no sistema a fim de explicar o que está ocorrendo no fenômeno.

As questões energéticas que figuram neste tipo de problema precisam ser discutidas a partir de equações energéticas apropriadas, tal como a Primeira Lei da Termodinâmica. Primeiramente devemos considerar que a ação do homem de exercer força sobre a parede provém de esforço muscular e sobretudo das reações químicas que ocorrem nos músculos. Quando uma reação química é produzida dentro do corpo, ocorrem variações de energia interna (ΔU_Q), volume (ΔV_Q) e entropia (ΔS_Q). É importante saber que as reações químicas que ocorrem no corpo humano possuem características peculiares, como, por exemplo, a de serem realizadas em um ambiente em que a pressão externa é mantida constante (P) e em contato com uma fonte de calor a temperatura T. Se uma a reação química ocorre, parte da energia interna é aproveitada para expansão (assim realizando um trabalho τ_Q) e a outra parte se destina a fonte de calor a fim de garantir que a entropia não diminua, conforme prevê a Segunda Lei da Termodinâmica.

Quando $\Delta V_Q < 0$, a pressão externa realiza trabalho sobre o sistema e quando $\Delta S_Q > 0$, então o reservatório de calor aumenta a energia interna do sistema. Seguindo a mesma metodologia que usamos nos problemas do quarto capítulo, podemos escrever a seguinte equação:

$$\Delta E_c + \Delta U_Q = \tau_F + \tau_Q + Q_Q$$

Da expressão acima temos que $\tau_F = 0$, $\tau_Q = -P.\Delta V_Q$, $Q_Q = T.\Delta S_Q$ e $\Delta E_c^{cm} = \frac{Mv_0^2}{2}$.

$$\frac{Mv_0^2}{2} + \Delta U_Q = 0 - P.\Delta V_Q + T.\Delta S_Q$$

$$\frac{Mv_0^2}{2} = -\Delta U_Q - P.\Delta V_Q + T.\Delta S_Q$$

$$\frac{Mv_0^2}{2} = -\Delta H_Q + T.\Delta S_Q$$

$$\frac{Mv_0^2}{2} = -\Delta G_Q$$

$$\boxed{F.\Delta S_{cm} = -\Delta G_Q}$$

Onde ΔH_Q e ΔG_Q são:

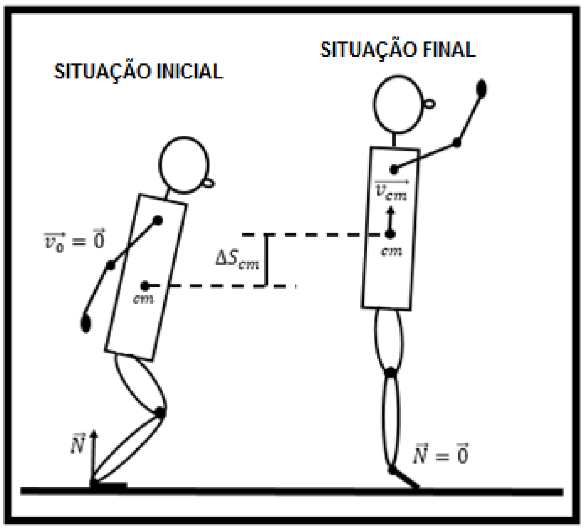
$$\begin{cases} \Delta H_Q = \Delta U_Q + P.\Delta V_Q \\ \Delta G_Q = \Delta U_Q + P.\Delta V_Q - T.\Delta S_Q \end{cases}$$

Analisando o desenvolvimento feito, note que: $\frac{Mv_0^2}{2} = -\Delta G_Q$. A oposição de sinais na equação nos faz compreender que para ganhar energia cinética para deslocar o centro de massa do sistema é preciso gastar a energia proveniente das reações químicas.

Em relação a toda abordagem feita para responder o problema perceba que no fim encontramos que $F.\Delta S_{cm} = -\Delta G_Q$. A força $\vec{F}$ aplicada pela parede sobre o homem possui mesma intensidade da força que homem faz sobre a parede. Note que se mantivermos o deslocamento do centro de massa fixo, o que satisfatoriamente ocorre quando uma mesma pessoa repete o fenômeno de empurrar a parede, então o gasto energético será tão maior quanto a intensidade da força aplicada pela parede. Isso significa que quanto maior for a intensidade da força que o homem aplica sobre a parede, maior será a necessidade de consumir a energia química das reações que ocorrem no corpo humano e consequentemente maior também será a energia cinética do seu centro de massa.

1.4 – Problema 4: Uma pessoa pulando

Considere uma pessoa de massa M que salta verticalmente a partir do repouso e desloca seu centro de massa uma distância ΔS_{cm} na presença de um campo gravitacional de intensidade g.



A partir dos dados do enunciado e dos conhecimentos de termodinâmica, encontre uma e expressão que relacione as transformações químicas (energia de Gibbs) com o pseudotrabalho realizado pela força Normal (média) que atua nos pés da pessoa.

- **Solução:**

A partir da figura verificamos que o ponto de aplicação da força $\vec{N}$ não realiza deslocamento e por este motivo não pode realizar trabalho. Se durante a ação de pular nós desprezarmos os movimentos das partes móveis do sistema (pessoa) em relação ao centro de massa e consideramos que a resultante das forças que atuam sobre a pessoa tem módulo $F_r = N - M.g$, então podemos escrever o Teorema do Centro de Massa como:

$$\tau_{ps} = \Delta E_c^{cm}$$

$$(N - M.g).\Delta S_{cm} = \frac{Mv_{cm}^2}{2}$$

$$N.\Delta S_{cm} = \frac{Mv_{cm}^2}{2} + M.g.\Delta S_{cm}$$

Analogamente ao que fizemos no problema anterior, a força $\vec{N}$ representa a reação da força exercida pela pessoa no solo e assim sendo quanto maior for a intensidade da força que a pessoa aplica no solo, maior também será a intensidade da força $\vec{N}$. Para que a pessoa possa exercer força sobre o solo, novamente devemos destacar os processos biológicos, como as reações bioquímicas que ocorrem nos músculos da pessoa, como fonte para produzi-la.

Para conciliar a energia mecânica vislumbrada durante a ação do pulo e a energia química que é usada para exercer essa função, podemos aplicar a Primeira Lei da Termodinâmica para fase inicial e final do pulo, enquanto ainda existe o contato dos pés da pessoa com o solo.

$$\Delta E_c + \Delta U_Q = \tau_P + \tau_Q + Q_Q$$

$$\frac{Mv_0^2}{2} + \Delta U_Q = -M.g.\Delta S_{cm} - P.\Delta V_Q + T.\Delta S_Q$$

$$\frac{Mv_{cm}^2}{2} + M.g.\Delta S_{cm} = -\Delta G$$

Como sabemos que: $\frac{Mv_{cm}^2}{2} + M.g.\Delta S_{cm} = N.\Delta S_{cm}$, então podemos concluir que a energia livre de Gibbs e o pseudotrabalho da força $\vec{N}$ então relacionados a partir da seguinte igualdade:

$$N.\Delta S_{cm} = -\Delta G$$

Desta última equação perceba que novamente o pseudotrabalho realizado por uma força corresponde ao simétrico da variação da energia livre de Gibbs. Isso significa que se aumentarmos a intensidade do pseudotrabalho (particularmente o módulo da força normal) é preciso que as reações químicas que ocorrem nas células musculares liberem mais energia para executar essa atividade. Já a equação (5.13) também mostra que o aumento da energia mecânica no sistema ($\frac{Mv_{cm}^2}{2} + M.g.\Delta S_{cm}$) é proveniente das reações bioquímicas. A energia usada para o aumento da energia mecânica decorre da energia liberada para a realização de trabalho nas fibras musculares quando ocorrem reações bioquímicas nas células dos músculos.