

Introdução

De acordo com as Leis de Newton o movimento descrito pelo centro de massa de um corpo - seja ele rígido ou não -, ou de um sistema formado por diversos corpos, depende apenas das forças externas sobre ele exercidas. Se um corpo estiver sujeito a um campo gravitacional externo uniforme, tal como o campo existente nas proximidades da superfície da Terra, e se ele estiver livre de outras ações externas, o seu centro de massa é acelerado verticalmente para baixo à razão de $9,8 \text{ m/s}^2$ em cada segundo, aproximadamente. Entretanto, se esse corpo não for rígido, é possível que existam interações entre as partes que o compõem. Então, enquanto o seu centro de massa descreve efetivamente um movimento de queda livre, algumas partes do corpo podem estar sofrendo acelerações maiores ou menores do que a aceleração da gravidade. A seguir descrevemos uma situação em que tal possibilidade se apresenta.

Uma mola helicoidal em queda livre

As imagens da Fig. 1 mostram duas fotos sobre o movimento de queda livre de uma bola de mini-snooper e de uma *mola maluca* de plástico. Na Foto 1 a bola e a mola encontram-se em repouso, ambas sustentadas pelas mãos de um experimentador. Observa-se que o espaçamento entre os elos adjacentes da mola não é uniforme, evidenciando que as forças elásticas, internas à mola, aumentam de baixo para cima.

A Foto 2 apresenta um instante das quedas simultâneas da bola e

da mola. A tomada dessa foto foi feita quase que imediatamente depois de os dois objetos terem sido soltos. Observando as posições da bola em cada foto da Fig. 1, concluímos que ela cai aproximadamente 30 cm (3 decímetros na régua que aparece nas fotos) e considerando que sua aceleração seja a da gravidade ($9,8 \text{ m/s}^2$), estimamos o tempo de queda em cerca de $\frac{1}{4} \text{ s}$.

Comparando-se as Fotos 1 e 2 percebe-se que, no mesmo intervalo de tempo em que a bola caiu 30 cm, o deslocamento do elo superior da mola foi de aproximadamente 90 cm, o que implica uma queda com acele-

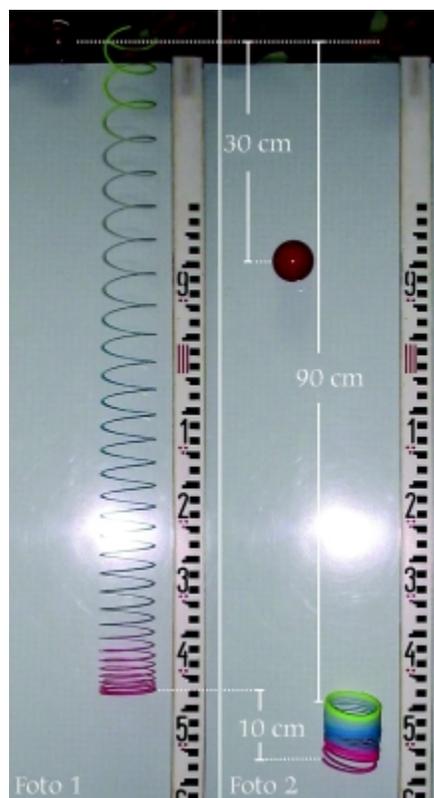


Figura 1. Posições da bola e da mola, em repouso (Foto 1) e em queda livre (Foto 2).

.....
Fernando Lang da Silveira

Instituto de Física
 Universidade Federal do Rio Grande do Sul
 E-mail: lang@if.ufrgs.br.

.....
Rolando Axt

Departamento de Física, Estatística e Matemática
 UNIJUÍ

.....

Na queda livre de uma mola podem acontecer acelerações muito diferentes da aceleração gravitacional em regiões diversas da mola. Mostra-se que, surpreendentemente para a nossa intuição, ao se iniciar a queda livre de uma mola, uma das suas extremidades permanece em repouso durante algum tempo enquanto a outra extremidade desce com acelerações maiores do que a aceleração gravitacional. Acelerações maiores do que a da gravidade ocorrem também no *bungee jumping*.

ração média de cerca de 30 m/s^2 ! Enquanto isso, o elo inferior da mola se deslocou apenas cerca de 10 cm, o que significa que a sua aceleração média ficou em torno de 3 m/s^2 (o leitor poderá conferir esses valores nas fotos com uma régua).

Forças e acelerações após a liberação da mola

Na Fig. 2 estão representados alguns elos da extremidade superior da mola bem como as forças exercidas sobre o elo superior (mostrado em destaque) quando (i) a mola ainda está suspensa e (ii) imediatamente após sua liberação.

Na situação de equilíbrio em que a mola se encontra inicialmente, são exercidas três forças sobre o elo superior: a força realizada pelo experimentador que mantém presa a mola, o peso do elo e uma força elástica para baixo que o restante da mola, que pende do primeiro elo, exerce sobre ele. Essa força elástica possui a mesma intensidade do peso de todos os elos que se encontram abaixo do primeiro elo. Portanto, na mola da Fig. 1, que possui 32 elos, a força elástica sobre o elo superior tem o mesmo valor do peso dos 31 elos a ele suspensos.

Quando a mola é liberada para cair, a força exercida para mantê-la presa deixa de existir. Imediatamente após a liberação, como as deformações na mola ainda são idênticas às da mola em equilíbrio, as forças elásticas possuem as mesmas intensidades que

tinham na mola antes que ela fosse solta. De acordo com a Fig. 2, o elo superior da mola fica então sob a ação de duas forças para baixo: o peso do próprio elo e a força elástica. Como a força elástica tem a intensidade do peso de 31 elos, somando a este valor o peso do próprio elo, concluímos que a intensidade da força resultante sobre o elo superior é 32 vezes maior do que o peso dele. Assim sendo, imediatamente após a liberação da mola, a resultante das forças sobre o elo superior é muito grande em comparação com o próprio peso do elo. Na situação da Fig. 1, essa força produzirá no elo superior uma aceleração inicial 32 vezes maior do que a aceleração da gravidade!!!

Generalizando para uma mola com N elos, é fácil se concluir que aceleração inicial do elo superior, imediatamente após a mola ser solta para cair, é N vezes maior do que a aceleração gravitacional. Em seguida, como a força elástica exercida sobre o elo superior começa a diminuir, a aceleração desse elo também se reduz.

A Fig. 3 destaca a parte inferior restante da mola e as forças que sobre ela são exercidas.

Antes de se soltar a mola, a parte suspensa ao elo superior, composta de 31 elos, está em equilíbrio sob efeito de apenas duas forças de mesma intensidade, o peso e a força elástica. Imediatamente após a liberação da mola, as deformações ainda não se alteraram e, portanto, a força elástica sobre a parte inferior restante continua sendo exercida com a mesma intensidade equivalente ao peso de 31 elos. Assim, imediatamente após a liberação da mola, a parte inferior restante ainda não possui aceleração, encontrando-se pois em repouso.

As deformações na mola, e portanto as forças elásticas, se reduzem gradativamente de cima para baixo, elo após elo. Então, à medida que isso acontece, os elos sucessivos, a começar pelos de cima, são acelerados. Ou seja, transcorrerá algum tempo, mesmo que muito pequeno, até que o último elo inicie a descida.

Olhando-se a mola como um todo, esse efeito atribuído às forças exercidas sobre os elos individuais implica que a ponta inferior da mola, quando o

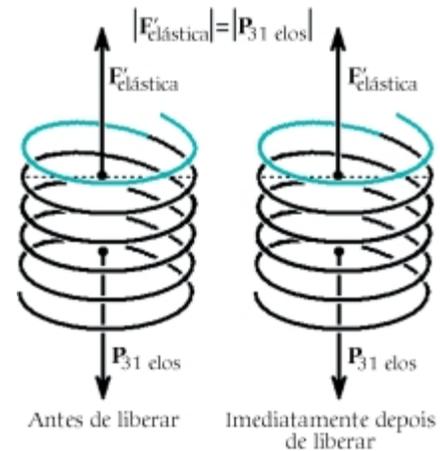


Figura 3. Forças aplicadas ao restante da mola antes de liberá-la e imediatamente depois.

centro de massa (CM) começa a cair, “paire” estático por algum tempo, enquanto a parte superior experimenta uma aceleração inicial muito maior do que a aceleração da gravidade, mas esses dois efeitos ocorrem sempre de um modo tal que a aceleração do CM da mola seja idêntica à aceleração gravitacional, como deve ser de acordo com as Leis de Newton.

Efeito da adição de massa ao elo superior da mola

As fotos da Fig. 4 mostram uma mola diferente da mola da Fig. 1. Na parte de baixo da mola diversos elos foram unidos entre si com fita adesiva.

As Fotos 1 e 2 nos permitem analisar o movimento do elo superior da mola. Nas Fotos 3 e 4 foi adicionado a esse elo um objeto rígido de plástico. Desta forma, pode-se comparar a queda da mola e da bola em duas situações nas quais as massas da extremidade superior não são iguais. Observamos nas Fotos 2 e 4 que a bola caiu quase pela mesma altura nos dois casos que estamos analisando. A situação, contudo, é bem diferente para o movimento da extremidade superior da mola. O deslocamento dessa parte é flagrantemente menor quando há mais massa para ser acelerada (19 cm na Foto 4 contra 47 cm na Foto 2). Isso se explica pelo fato de que, nesse movimento inicial de descida, a força resultante sobre a extremidade superior é a soma do peso dessa extremidade com a força elástica inicial. Como esta última permanece

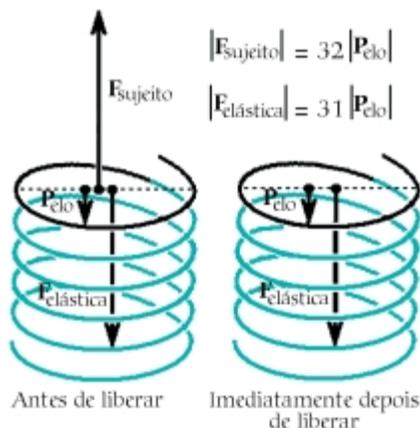


Figura 2. Forças aplicadas ao elo da extremidade superior da mola antes de liberá-la e imediatamente depois.

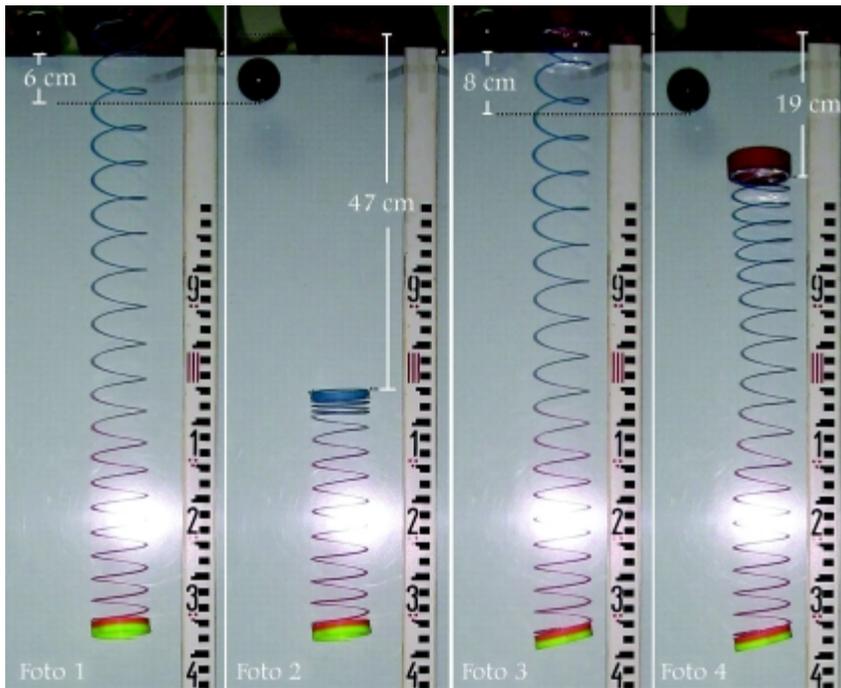


Figura 4. Molas com massas diferentes na extremidade superior.

inalterada nos dois casos em consideração, na situação da Foto 4, o aumento de peso causado pelo acréscimo de massa, e o conseqüente acréscimo no valor da força resultante, não é suficiente para compensar o efeito inercial do acréscimo de massa à extremidade superior da mola. Em outras palavras, o acréscimo da massa determina um incremento maior na inércia da extremidade superior da mola do que aquele que acontece na força resultante e, como decorrência, a aceleração é menor.

Analisando as Fotos 1 e 2, o próprio leitor facilmente poderá estimar a aceleração média, em relação à régua graduada, da parte superior da mola (elo superior) em quase 8 vezes o valor da aceleração gravitacional! Como os intervalos de tempo de queda são os mesmos para a mola e a bola, a razão entre as acelerações médias é igual à razão entre os deslocamentos, portanto, $47/6 = 7,8$. Refazendo o mesmo cálculo nas Fotos 3 e 4, o leitor concluirá que o valor da aceleração da extremidade superior da mola (ou seja, do elo colado ao corpo rígido) cai para apenas 2 vezes o valor da aceleração

da gravidade (a razão entre os deslocamentos é $19/8 = 2,4$).

O mais surpreendente para a nossa intuição é que, tendo já se iniciado a queda livre do CM da mola, a parte inferior possa permanecer em repouso durante algum tempo para só depois começar a descer com aceleração crescente e que, enquanto isso, a extremidade superior da mola esteja descendo com uma aceleração inicial muito maior do que a aceleração da gravidade!

No bungee jumping a pessoa que salta sofre já ao iniciar a queda acelerações maiores do que a aceleração gravitacional, pois o cabo abaixo dele está tensionado antes do salto

Considerações finais

As acelerações na parte superior de molas em queda livre com características elásticas e mecânicas diferentes das molas utilizadas neste trabalho podem ser ainda maiores do que as registradas na Fig. 4. As fotos da Fig. 5 permitem fazer a comparação entre a queda livre de uma *espiral de encadernação* (utilizada como mola e tensionada por um corpo de 100 g na sua extremidade inferior) e a queda livre de um bloco de madeira. Um papel enrolado foi enfiado na extremidade superior da espiral. Observa-se que esse papel somente não saiu de dentro da

mola porque a alça superior da mola o conteve. Esse efeito se deve à enorme aceleração da extremidade superior, estimada em 40 vezes o valor da aceleração gravitacional!! Enquanto isso acontece na parte superior da mola, o “peso” suspenso a ela permanece praticamente parado!!

Em molas de aço, inicialmente tensionadas por corpos a elas suspensos, poderão ocorrer acelerações ainda maiores do que as observadas na *espiral de encadernação*.

Existem outros sistemas nos quais ocorrem acelerações maiores do que a da gravidade devido a forças elásticas internas a eles. Por exemplo, no *bungee jumping*, esporte no qual uma pessoa salta de lugares altos com um longo cabo elástico (denominado *bungee*) preso aos seus pés. A pessoa que salta sofre já ao iniciar a queda acelerações maiores do que a aceleração gravitacional. Esse efeito se deve a que o cabo que pende abaixo dela está tensionado antes do salto e, assim, a pessoa começa a queda sob o efeito do seu peso e da força elástica que também a puxa para baixo.

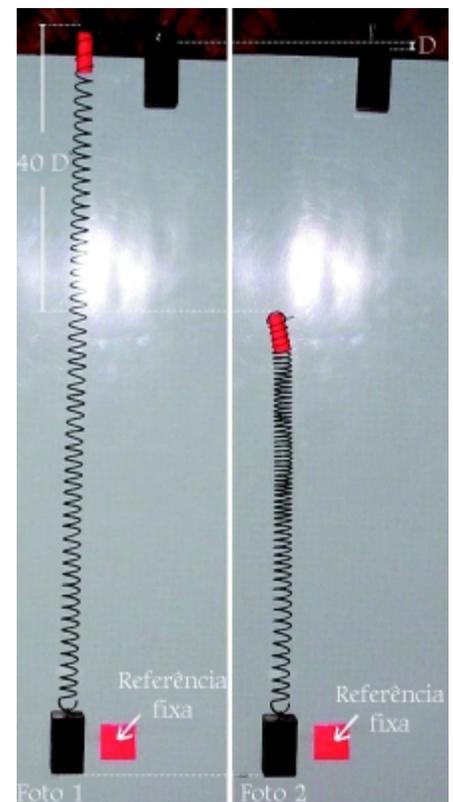


Figura 5. Na Foto 1 uma *espiral de encadernação* (tensionada por um “peso”) e um pequeno bloco de madeira estão em repouso. Na Foto 2 ambos estão em queda livre.