

Produtos e Materiais Didáticos

A utilização da filmadora digital para o estudo do movimento dos corpos (Using the camcorder to study bodies movement)

B.N. Sismanoglu¹, J.S.E. Germano, J. Amorim e R. Caetano

Instituto Tecnológico de Aeronáutica, Comando Geral de Tecnologia Aeroespacial, São José dos Campos, SP, Brasil
Recebido em 18/3/2008; Revisado em 12/5/2008; Aceito em 6/2/2009; Publicado em 30/4/2009

Através de uma filmadora digital e do software de domínio público *VirtualDub* consegue-se registrar espacial e temporalmente a evolução dinâmica de um sistema muito rápido, como por exemplo, a queda livre. Neste artigo são abordados dois experimentos clássicos de queda livre: a) de uma corrente de elos e b) de uma configuração catenária da corrente com uma das extremidades fixa (*bungee jump*). Estes experimentos são analisados empiricamente através de montagens bastante simples, mas reveladores de conceitos físicos importantes da mecânica. O programa *VirtualDub* possibilita selecionar os quadros da filmagem. A análise destes quadros fornece prontamente elementos das diversas variáveis dinâmicas tais como velocidade, força e aceleração, sendo um poderoso auxiliar no estudo do movimento.

Palavras-chave: mecânica, movimento, queda dos corpos, filmadora digital.

Using a digital camera and public common software *VirtualDub* it was possible to record the space-time evolution of a fast dynamic system, such as a body in free fall. This paper treats two classical free fall experiments: a) falling chain and b) a free falling folded chain (*bungee jump*). Analyzed empirically in a simple setup, these experiments showed very important concepts of mechanics. The *VirtualDub* program enables the selection of frames from the video record. The analysis of these frames provides elements of several dynamical variables such as velocity, force and acceleration, and is a powerful tool in the study of the movement.

Keywords: mechanics, movement, body free fall, digital camera.

1. Introdução

Através da experimentação consegue-se compreender melhor conceitos importantes da mecânica, como velocidade, aceleração, força, leis de conservação de energia e quantidade de movimento, entre outros. Equipamentos sofisticados, geralmente importados e portanto dispendiosos, facilitam a montagem de bons experimentos nesta área da física, onde a obtenção e análise de dados com o uso de sensores eletrônicos conectados a computadores e softwares fornecem, em tempo real, informações acerca do fenômeno estudado. Instituições nacionais de nível médio e superior que possuem tais equipamentos podem desenvolver práticas de laboratório as mais diversas possíveis, de acordo com a criatividade e conhecimentos do professor-experimentador, tornando o laboratório um ambiente facilitador da aprendizagem científico-tecnológica.

Por outro lado, sabe-se que muitos cursos de ciências exatas no âmbito nacional têm carência destes equipamentos, ou nem sequer possuem laboratório de nível fundamental de física. Deste modo, especialistas na área de ensino sugerem que os professores usem a cria-

tividade em salas de aula para desenvolver atividades e a interatividade com os estudantes, como forma de ensinar as disciplinas, despertando a curiosidade científica dos alunos [1] e “promovendo a motivação da observação” [2]. Percebe-se que a ausência de materiais de laboratório não justifica a inércia com relação ao avanço que se faz necessário na elaboração e implementação de experimentos, que tragam no seu bojo não só a simples execução, mas também o desenvolvimento de todo o conhecimento necessário. Para isso, a criatividade e a dedicação do professor, e do próprio aluno, tornam-se fundamentais.

Indo de encontro a isto, este artigo estuda o experimento clássico da corrente de elos que cai sob a ação do campo gravitacional (Fig. 1). Trata-se de um experimento que possui diversas versões e neste artigo serão desenvolvidos os dois casos mais comuns. O primeiro refere-se à queda livre da corrente suspensa na vertical, a partir do seu repouso, com sua extremidade inferior fixa a um sensor de força. Este recebe todo impacto dos sucessivos elos durante o tempo de queda da corrente. O objetivo aqui é mostrar que a queda livre da corrente tem intensidade de aceleração igual à da gravidade local

¹E-mail: bogos@ita.br.

g e que a força indicada pelo sensor aumenta durante o tempo de queda, até alcançar o triplo da força peso da corrente, quando então o último elo atingiu o sensor.

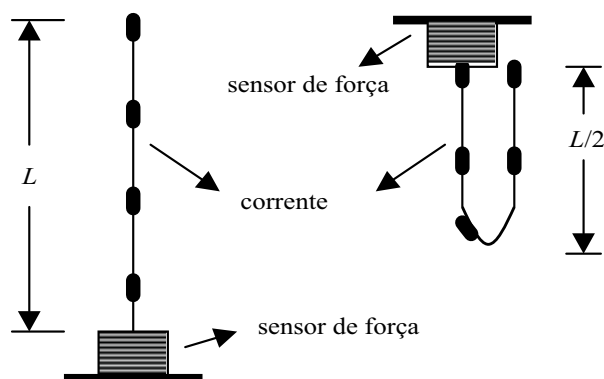


Figura 1 - Experimento da queda de uma corrente de elos (esquerda) e da corrente em forma de catenária.

O segundo experimento com corrente é uma modalidade mais complexa, executada por Schagerl *et al.* [3], onde a mesma corrente é presa num ponto fixo (sensor de força) acima do solo (Fig. 1), e a extremidade livre é abandonada do seu repouso numa posição bem próxima da outra extremidade e à mesma altura desta. O formato da corrente é de uma catenária (formato de U) com pequena abertura. A corrente de elos de metal deve ter densidade linear constante ao longo de seu comprimento e elos pequenos conectados entre si com boa flexibilidade. Comparativamente com o experimento anterior, verifica-se aqui um interessante “paradoxo”: a intensidade da aceleração da corrente em queda é superior à da aceleração da gravidade local.

Portanto, estes dois exemplos de experimentos e outros similares podem ser realizados em qualquer ambiente, aprofundados de acordo com o nível de ensino dos alunos, sem ter a necessidade do rigor de um laboratório de física convencional, e com materiais simples de se obter e principalmente atrativos para o discente, como é o caso do computador e da filmadora digital, bastante difundidos no país. A função da filmadora digital nestes experimentos será explicada na próxima seção.

2. O uso do vídeo

A utilização do vídeo como ferramenta de laboratório e de sala de aula é importante, pois ajuda a esclarecer dúvidas do objeto de estudo, permite a aquisição de dados de maneira precisa e torna o processo ensino-aprendizagem bastante atraente para o aluno. A motivação alcançada com o uso destas novas tecnologias é observada através da promoção de um ensino mais eficaz e estimulante.

Uma das razões para o uso do vídeo e do computador nas aulas de física é que a aprendizagem torna-se mais ativa, principalmente devido ao fato de que

os alunos sentem-se mais motivados a estudarem um fenômeno “real” captado em tempo real pela filmadora e com a particularidade de ser reproduzida num computador em sala de aula.

Foi citado na seção anterior que na realização dos experimentos há a necessidade de um sensor de força, que registre com muita rapidez a sua variação no tempo. Requer-se também um photogate para se determinar com bastante precisão intervalos de tempo. Pode-se utilizar a filmadora digital como “sensor de tempo” e uma mola elástica que se deforma de acordo com a lei de Hooke fazendo o papel de “sensor de força”. A imagem digital gerada da filmagem da deformação muito rápida da mola pode ser salva no computador. Através do software *VirtualDub* [4], editor completo de áudio e vídeo de domínio público, o experimento gravado num arquivo de extensão avi, mpeg2 ou vob pode ser transformado numa sequência de quadros para posterior análise. Para se saber qual é a taxa de amostragem que uma determinada câmera pode gerar, basta abrir o arquivo do vídeo na página principal do *VirtualDub* e seguir os seguintes passos: file – file information – frame size, e obter a informação sobre o número de quadros disponibilizados por segundo.

Com a câmera utilizada na realização dos experimentos deste artigo (Kodak DX7630) consegue-se produzir 25 quadros por segundo (0,04 s por quadro). Assim, se a mola sofre uma deformação grande durante apenas 0,5 s, este intervalo de tempo pode gerar 12 quadros, suficientes para se levantar uma curva que mostre a deformação da mola em função do tempo, ou melhor, a força elástica variando no tempo. A filmadora poderá ser acionada antes do início da deformação da mola e, através dos quadros obtidos, poderemos ver o exato momento do início de sua elongação. Este quadro será então o representativo do instante inicial $t_0 = 0$ da variação do comprimento da mola.

Poder-se-ia usar um sensor de força comercial da PASCO® [5] mas, além de ser dispendioso e necessitar de vários outros componentes, a decisão pelo uso da filmadora torna o aprendizado um processo lúdico e principalmente remete aos conceitos fundamentais da física. Não se deve esquecer que antes de mais nada, a mola utilizada deve ter sua constante elástica previamente determinada através de um experimento no modo estático ou dinâmico. Neste último, a filmadora poderá também entrar em ação na determinação da frequência de oscilação da mola.

Pode-se determinar o tempo de queda da corrente também com o uso da filmadora: prende-se ligeiramente o elo de uma extremidade da corrente num ponto fixo próximo ao chão e levanta-se a outra extremidade verticalmente; prende-se uma bolinha vermelha no elo mais alto, para que seja visível na filmagem; coloca-se a filmadora focalizando o elo mais baixo; pode-se dar início à queda através de um processo mecânico ou com o uso de um eletro-ímã com um “led”, que indica na ima-

gem o instante $t_0 = 0$. Uma corrente com comprimento $L = 1,35$ m em um local onde a aceleração da gravidade é $g = 9,78$ m/s² resulta um tempo de queda de aproximadamente 0,53 s. Isto fornece 13 quadros, o bastante para se obter o tempo de queda com boa precisão. Então, no 13º quadro deve-se observar a bolinha vermelha no ponto mais baixo da trajetória. Num outro experimento, podem ser usadas outras correntes com diferentes densidades lineares, porém com mesmo comprimento, a fim de estudar a queda livre dos corpos e mostrar que o tempo de queda é igual para todas elas. Aqui também o uso do cronômetro se torna impraticável por causa do tempo de reação do operador.

3. Abordagem teórica

3.1. Corrente de elos em queda livre

Seja uma corrente de elos de comprimento total L e massa M . A Fig. 2 mostra num dado instante t a distância y percorrida pela corrente, além dos vetores-força peso $\mathbf{P} = m\mathbf{g}$ do centro de massa C.M. do remanescente da corrente ainda suspensa neste instante e da força de reação \mathbf{R} da superfície horizontal.

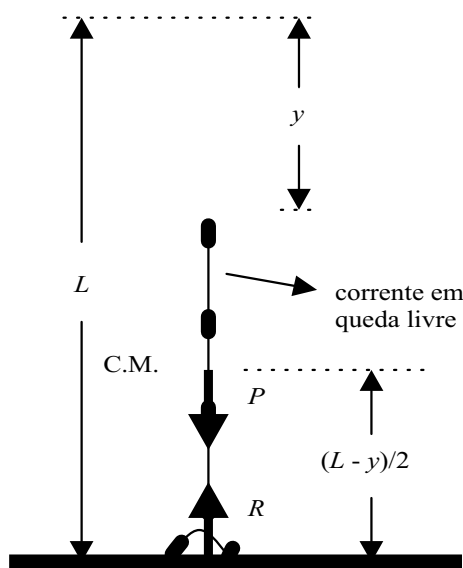


Figura 2 - Corrente de elos em queda livre.

Aplicando-se o princípio fundamental da dinâmica (PFD), ou segunda lei de Newton, neste instante, na corrente de comprimento $L - y$ de massa m tem-se

$$mg - R = \frac{d(mv)}{dt} = \frac{dm}{dt}v + m\frac{dv}{dt}, \quad (1)$$

onde mv é o momento linear. Mas $dv/dt = g$. Logo, $R = -v(dm/dt)$. Como a densidade linear μ da corrente é constante, pode-se escrever

$$\mu = \frac{M}{L} = \frac{dm}{dy}. \quad (2)$$

Visto que a aceleração da corrente é constante, pode-se usar a equação de Torricelli para determinar a velocidade da corrente

$$v^2 = v_0^2 + 2gy. \quad (3)$$

Finalmente, substituindo-se as Eqs. (2) e (3) na Eq. (1), obtém-se R

$$R = -v\frac{dm}{dt} = -v\frac{d}{dt}\left(\frac{M}{L}dy\right) = -v^2\frac{M}{L} = -2Mg\frac{y}{L}. \quad (4)$$

Verifica-se que R é uma força vertical e dirigida para cima e cujo módulo tem intensidade máxima igual a $2Mg$ quando o último elo atinge o contato horizontal, ou seja, para $y = L$. Neste instante, pela terceira lei de Newton ou lei da ação e reação, a força total que a corrente exerce neste ponto de contato é igual à soma desta força $2Mg$ com o peso total da corrente Mg , resultando $3Mg$. Como todos os pequenos elos possuem aceleração \mathbf{g} durante a queda, pode-se escrever também

$$F = 3Mg\frac{y}{L} = \frac{3Mg}{L}\left(\frac{1}{2}gt^2\right) = \left(\frac{3Mg^2}{2L}\right)t^2 = kt^2. \quad (5)$$

Logo, a força máxima aplicada no apoio horizontal é diretamente proporcional ao quadrado do tempo. Na montagem experimental deste artigo, que será descrita posteriormente na seção 4, $M = 4,0 \times 10^{-2}$ kg, $g = 9,78$ m/s², $L = 1,35$ m e portanto para o tempo em segundos, esta força em Newtons será

$$F = 4,25t^2 \quad (6)$$

3.2. Catenária de corrente com vínculo em queda no campo gravitacional

Na Fig. 3 uma corrente em forma de U está fixa no ponto A e a outra extremidade livre é posicionada ao lado deste ponto. Num dado instante a extremidade livre B é abandonada do seu repouso. Objetiva-se estudar experimentalmente a força de sustentação variável no ponto A, o tempo de queda e a velocidade da extremidade B e verificar que a intensidade da aceleração de queda é maior que a intensidade da aceleração da gravidade local g . Este é um problema de difícil solução analítica, pois na realidade a corrente é constituída de elos e, portanto, o modelo que mais se aproximaria seria o de um acoplamento de pêndulos vinculados entre si, cada elo sendo representado por um pêndulo com haste rígida.

Em seu artigo Chun Wa Wong *et al.* [8] adotam um tratamento Lagrangiano do problema para resolvê-lo.

Através de seus resultados, observa-se que já a partir do início da queda a corrente possui aceleração com intensidade maior que a da queda livre. Obtêm-se então expressões para a intensidade da velocidade de queda da extremidade livre (B) da corrente, em função do tempo, e para a intensidade da força tensora no suporte A, que sustenta o segmento de corrente do lado esquerdo (Fig. 3). A equação que fornece esta força tensora é dada a seguir [8]

$$T_A = \frac{Mg}{4} \frac{2 + 2\frac{y}{L} - 3\left(\frac{y}{L}\right)^2}{1 - \frac{y}{L}}. \quad (7)$$

Na Eq. (7) observa-se que a força tensora cresce monotonicamente e tende ao infinito quando $y \rightarrow L$ (ponto mais baixo da trajetória). Isto também ocorre com a velocidade [8].

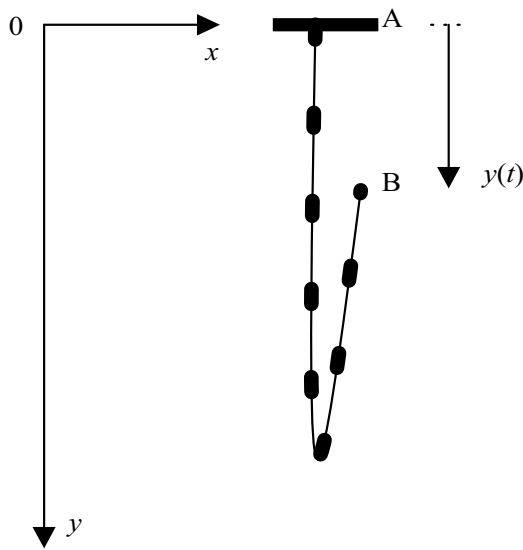


Figura 3 - Corrente de elos fixa num ponto alto A e com a extremidade B livre para cair.

No instante inicial $t_0 = 0$, $y = 0$ e, portanto, $T_A = Mg/2$, ou seja, a intensidade da força tensora no ponto A é igual à metade do peso da corrente. Foi citado anteriormente que esta equação foi derivada para o caso ideal onde cada elo da corrente tem dimensão infinitesimal e portanto, para o caso real, y/L deve ser interpretado como a razão entre o número de elos que atingiu o ponto mais baixo pelo número total de elos da corrente. Exemplificando, obtêm-se a força máxima $T_A(79/81) = 11,1 Mg$, para uma corrente com 81 elos quando o último elo está na iminência de alcançar o ponto mais baixo da trajetória.

Em seu artigo, Schagerl *et al.* [3] dão uma explicação qualitativa para o fato intrigante de que a corrente neste experimento possui aceleração superior ao da queda livre, verificado experimentalmente e também previsto por Chun Wa Wong *et al.* [8]. Eles utilizaram correntes metálicas de bolinhas unidas com hastes livres, usadas para acionar ventilador de teto (no formato -o-o-o-o-o-o-o-o-). Verificaram que durante

a queda da corrente, a porção esquerda desta, presa no ponto A (Fig. 3), permanece imóvel na posição vertical. Deste modo, a bolinha b_i que chega ao ponto mais baixo da trajetória, e que irá “agregar massa” ao ramo esquerdo imóvel da corrente, estaciona neste ponto repentinamente, sem oscilação. Portanto, esta bolinha b_i executa um giro de 180° , e pára. Para que isto ocorra, uma força vertical F_i e dirigida para cima deve ser aplicada nesta bolinha, através da haste que a une com a bolinha subsequente b_{i+1} que desce, a fim de pará-la. Por sua vez, a reação a esta força se dá na bolinha b_{i+1} , puxando-a para baixo (3ª Lei de Newton). Esta força é a responsável pela aceleração adicional, acima do valor da aceleração da gravidade local g , desta parte da corrente.

4. Procedimentos experimentais e resultados

A Fig. 4 mostra o procedimento sugerido que deve ser seguido durante a fase de obtenção de dados. Logo após a montagem do experimento, posiciona-se a câmera digital ou webcam focalizando o segmento do experimento que se deseja investigar, como por exemplo, a deformação de uma mola. Transfere-se este filme para o computador convertendo-o na extensão *avi*, por exemplo. Através do *VirtualDub* selecionam-se os quadros mais interessantes do movimento que se queira estudar.

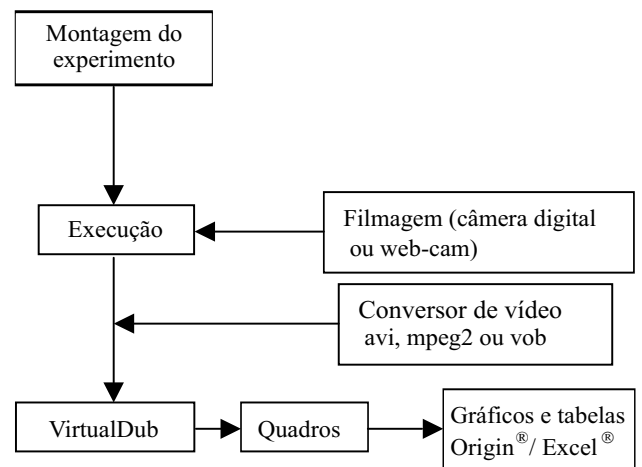


Figura 4 - Fluxograma do procedimento experimental.

4.1. Corrente de elos em queda livre

A Fig. 5 esquematiza a montagem necessária para a realização do experimento da corrente em queda livre. Poder-se-ia ter usado uma balança de precisão para a medição da força trocada com a corrente que cai sobre sua superfície. Esta força varia com o tempo de acordo com a Eq. (5). Como o tempo de queda é pequeno, inferior ao tempo de resposta da balança, esta possibilidade foi descartada. Para a medição da variação da força com o tempo, utiliza-se então uma mola elástica

que verticalmente sustenta um prato (Fig. 6). Neste, prende-se ligeiramente o elo mais baixo da corrente a fim de garantir a queda vertical da mesma.

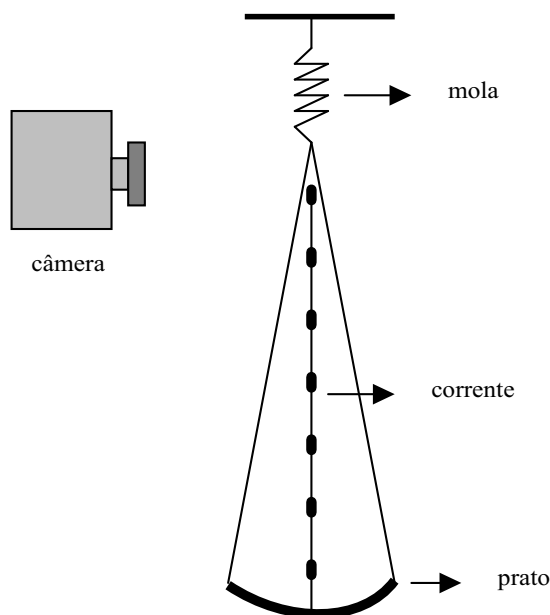


Figura 5 - Montagem experimental da queda livre da corrente.

Como a corrente gradativamente cai no prato, a deformação da mola pode fornecer a variação da força em função do tempo. A imagem da deformação da mola é captada através da filmadora. Para visualizar com mais nitidez a extremidade da mola e seu deslocamento, coloca-se um ponteiro que desliza sobre uma régua milimetrada, conforme se observa na Fig. 6.

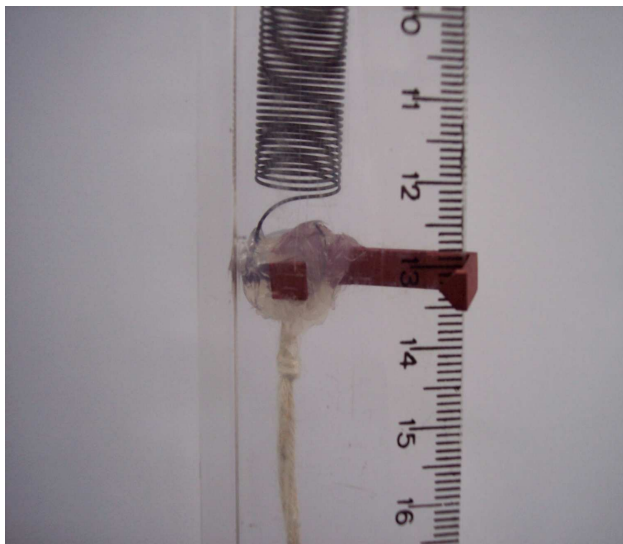


Figura 6 - Detalhe da fixação do ponteiro na extremidade inferior da mola.

A mola utilizada deve ser escolhida apropriadamente, de acordo com o peso que sustenta, dentro do limite de elasticidade que obedece a Lei de Hooke. Previamente, e num experimento adicional que também

pode ser realizado com o auxílio do vídeo, pode-se calibrá-la através de dois processos clássicos: a) medindo-se a elongação elástica da mola sob condições de equilíbrio estático, para massas aferidas, ou b) determinando-se o período de oscilação para massas compatíveis. Deste modo, obtém-se a constante elástica desta mola, que multiplicada pelo deslocamento medido a partir da posição de equilíbrio, fornece a força restauradora.

A partir do filme gerado da deformação da mola e do *VirtualDub*, pode-se construir uma tabela elencando esta deformação em função do tempo. Não se deve esquecer de focalizar não só o conjunto mostrado na Fig. 6 como também o operador segurando a extremidade superior da corrente, para que se saiba o exato instante inicial do seu abandono.

Para a montagem experimental, conforme foi citado na seção 3.1, o cálculo teórico do tempo de queda fornece 0,53 s. Pelos quadros fornecidos pelo *VirtualDub*, a deformação máxima da mola ocorre no instante 0,52 s. Logo, há muito boa concordância entre estes valores. Filmando-se o prato, observa-se que no instante 0,52 s o último elo atinge a superfície deste, e a partir daí, o prato começa a se deslocar para cima. Isto mostra que a mola sofre deformação apenas durante o intervalo de tempo em que os elos atingem o prato.

A Fig. 7 mostra o gráfico da força, em Newtons, calculada a partir de dados experimentalmente obtidos, com a ajuda da imagem da deformação da mola. Também neste gráfico há a variação temporal teórica desta força, de acordo com a Eq. (6). Vemos que há boa concordância entre as duas curvas, dentro das limitações do erro experimental. Este erro aparece por causa da leitura da deflexão do ponteiro (Fig. 6). Através deste gráfico notamos que a força máxima experimental, 1,1 N, está próxima do valor teórico, 1,2 N.

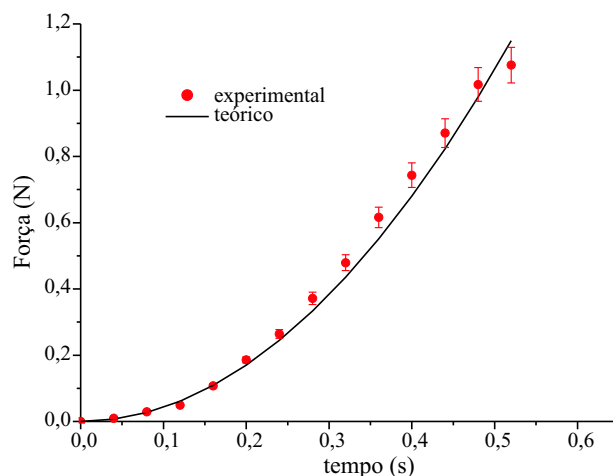


Figura 7 - Gráfico teórico e experimental da força aplicada em função do tempo da corrente em queda livre.

4.2. Catenária de corrente com vínculo em queda

A Fig. 8 mostra a corrente presa na mola suspensa na vertical e o operador segurando a outra extremidade da mola. A corrente é idêntica àquela utilizada no experimento 4.1 de queda livre, de massa $4,0 \times 10^{-2}$ kg e comprimento $L = 1,35$ m. Esta corrente não é a mais indicada para este tipo de experimento visto que os elos são grandes (Fig. 8) e soltos.

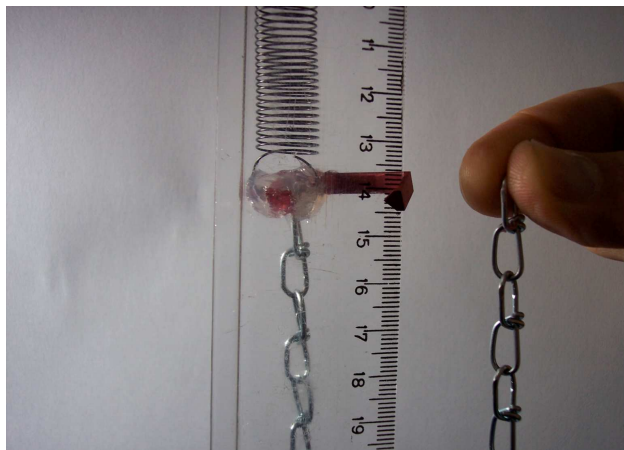


Figura 8 - Experimento da catenária de corrente em queda.

A corrente de bolinha usada para acionar ventilador de teto é mais apropriada, porém é mais custosa. Detalhes pormenorizados deste experimento com este tipo de corrente serão mostrados em um próximo artigo. Mesmo assim, pode-se verificar neste experimento que a intensidade da aceleração da queda da corrente é maior que g , de acordo com o gráfico da variação da força elástica da mola em função do tempo, obtida durante a queda da corrente.

Vimos que a queda livre desta corrente ocorre em 0,53 s. De acordo com o gráfico da Fig. 9, a deformação máxima da mola, que se dá no instante em que o último elo atinge o ponto mais baixo da trajetória, ocorre no instante 0,48 s, ou seja, abaixo do tempo de queda livre. Observa-se neste gráfico que no instante $t_0 = 0$ a força elástica é de 0,20 N, pois neste instante a mola sustenta a metade do peso da corrente, e o operador, a outra metade (ver Fig. 8).

Diferentemente do gráfico da Fig. 7, onde a variação da força elástica na mola que suporta a queda livre da corrente é proporcional ao quadrado do tempo, aqui observamos que pelo fato da intensidade da aceleração ser superior a g , a força aumenta rapidamente nos instantes finais da queda, entre 0,35 s e 0,45 s.

Estes dois experimentos descritos nas seções 4.1 e 4.2, além de outros tantos, são objeto de estudo nas aulas teóricas de mecânica do curso de Engenharia do Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), ministradas no Departamento de Física. Durante vários anos a abordagem foi exclusivamente teórica e se observava a

difficuldade dos alunos em “visualizar” o fenômeno estudado. Não havia, portanto, um experimento associado que mostrasse os resultados obtidos através dos cálculos e do uso de leis da física. No ano de 2007 procedeu-se na montagem destes experimentos sugeridos neste artigo e juntamente com a explanação teórica foi apresentada aos alunos a filmagem e todo o procedimento que levava aos resultados desejados. Com isto, alguns aspectos importantes dos experimentos foram discutidos e estudados com mais detalhes, devido à riqueza de informações obtidas através dos gráficos elaborados a partir da experimentação.

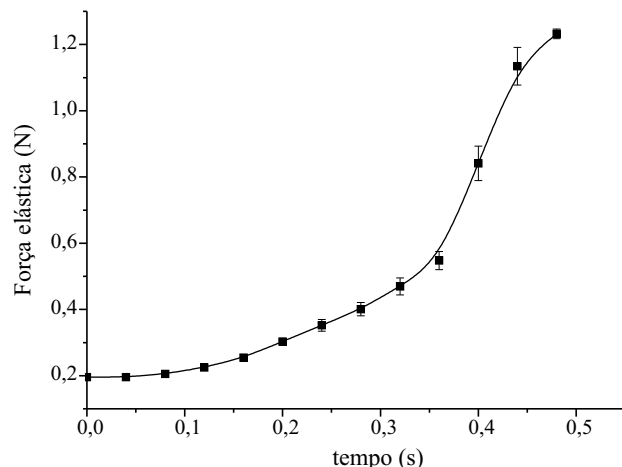


Figura 9 - Gráfico da variação da força elástica em função do tempo, no experimento da catenária de corrente em queda.

5. Conclusão

A câmera de vídeo digital, ou mesmo a webcam, são ferramentas facilmente disponíveis hoje em dia, tornando-se úteis no processo pedagógico, no sentido de se levar ao aluno o conhecimento e o entendimento de fenômenos físicos de processos complexos e muito rápidos, principalmente no estudo de movimentos.

Montagens experimentais de concepção simples, como a da queda livre dos corpos, podem ser estudadas através de experimentos que se utilizam do vídeo como contador de tempo. Outros mais complexos, como a da corrente de elos em queda, também podem ser implementados com a ajuda da câmera de vídeo, pois esta localiza no espaço e no tempo o objeto a ser estudado.

A utilização do vídeo nestes casos é importante, pois ajuda a esclarecer dúvidas do experimento, visto que o movimento é bastante rápido, permite a aquisição de dados de maneira precisa e torna o experimento bastante atraente para o aluno. A motivação alcançada com o uso da câmera de vídeo é observada através da promoção de um ensino mais eficaz.

Deste modo, a aprendizagem torna-se mais ativa, com a participação efetiva do grupo de alunos, devido ao fato de que estes se sentem mais motivados a estudarem o fenômeno através da captura da imagem do seu

movimento pela filmadora. A análise quadro a quadro do movimento revela manifestações do experimento que a princípio não se poderia facilmente perceber.

Referências

- [1] Jornal da Ciência, SBPC, 20/11/2007.
- [2] Regina Lico Suzuki, Diretora do Departamento de Orientação Técnica da Secretaria Municipal da Educação, Jornal O Estado de São Paulo, 19/11/2007.
- [3] M. Schagerl, A. Steindl, W. Steiner and H. Troger, Acta Mech. **125**, 155 (1997).
- [4] www.virtualdub.org, acesso em 26/02/2008.
- [5] www.pasco.com, acesso em 28/02/2008.
- [6] Keith R. Symon, *Mecânica* (Editora Campus, Rio de Janeiro, 1982).
- [7] H. Goldstein, *Classical Mechanics* (Addison-Wesley, Reading, 1980), 2nd ed.
- [8] Chun Wa Wong and Kosuke Yasui, Am. J. Phys. **74**, 6 (2006).
- [9] <http://noticias.uol.com.br/bbc/reporter/2007/11/29/ult4904u325.jhtm>, acesso em 29/11/2007.