



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

**Experimentos com o Acelerômetro
de *Tablets* e *Smartphones***

Leonardo Pereira Vieira
&
Carlos Eduardo Aguiar

Material instrucional associado à dissertação de mestrado de Leonardo Pereira Vieira, apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física da Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Rio de Janeiro
Outubro de 2013

Experimentos com o Acelerômetro de *Tablets* e *Smartphones*

Leonardo Pereira Vieira
Carlos Eduardo Aguiar

Resumo

Descrevemos experimentos de mecânica baseados no acelerômetro encontrado em *tablets* e *smartphones*. Os experimentos são apropriados a cursos introdutórios de física, em particular (mas não exclusivamente) do ensino médio.

1 O acelerômetro e sua leitura

O típico acelerômetro de um *tablet* ou *smartphone* é capaz de medir acelerações no intervalo $\pm 2g$ (g é a aceleração da gravidade), em relação a um referencial inercial. A resolução pode chegar a $0,002g$, mas na prática é limitada pelo ruído associado a vibrações mecânicas do aparelho. O sensor mede as componentes da aceleração em três eixos perpendiculares X, Y e Z; no iPad e iPhone esses eixos estão dispostos como na figura 1.

O acelerômetro não mede propriamente a aceleração \vec{a} , mas a grandeza

$$\vec{a}' = \vec{g} - \vec{a}, \quad (1)$$

onde \vec{g} é a aceleração da gravidade. Por exemplo, o acelerômetro de um *smartphone* colocado sobre uma mesa com a tela para cima indicará

$$a'_x = a'_y = 0, \quad a'_z = -9,8 \text{ m/s}^2.$$

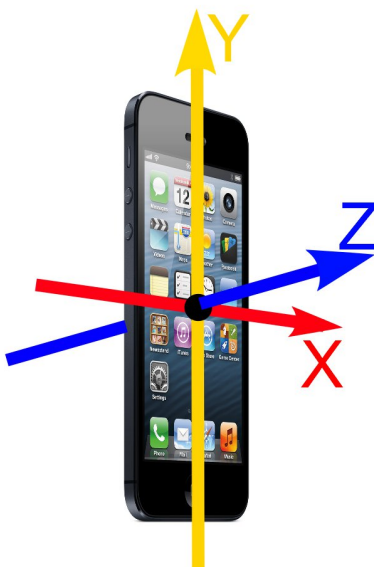


Figura 1: Orientação dos eixos que definem as componentes da aceleração de um iPad ou iPhone

Em queda livre (sem rotação) ele registrará $a'_x = a'_y = a'_z = 0$.

Existem vários programas leem as medidas do acelerômetro. Dois exemplos para sistemas da Apple são o *Acceleration* (Indiana University) e o *Sparkvue* (Pasco), ambos desenvolvidos para fins educacionais. Os dois programas estão disponíveis gratuitamente na “loja virtual” da Apple, são fáceis de usar, fazem gráficos da aceleração em tempo real e permitem enviar os dados gravados por *email*. Além de mostrar as medidas do acelerômetro, o *Acceleration* também calcula (por integração) a velocidade e posição do aparelho, possibilitando inúmeras aplicações didáticas. A tela inicial do *Acceleration* está mostrada na figura 2. O botão “Start” começa a gravação dos dados, a barra de deslizamento “Samples/second” é usada para determinar quantos dados por segundo serão gravados, as barras X, Y e Z indicam a aceleração em cada um dos eixos (em unidades de g), a barra “Time” permite exibir as medidas de instantes anteriores, o botão *email* envia os dados para o endereço eletrônico desejado, e o botão “Calibrate” zera a aceleração nos três eixos ao ser pressionado, eliminando o efeito da aceleração da gravidade. Os botões X,

Y, Z levam a outras janelas, que mostram o gráfico da aceleração em função do tempo para cada um dos eixos. Nessas janelas existem mais três botões, que permitem escolher gráficos da aceleração, velocidade e posição (figura 3).

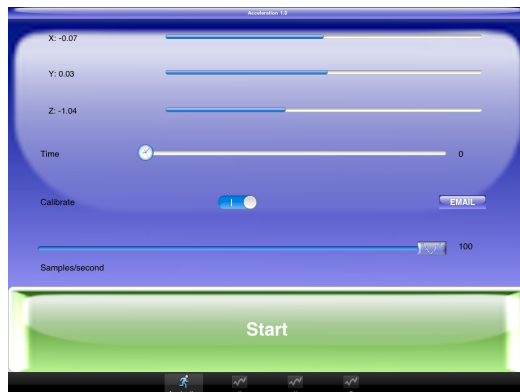


Figura 2: Tela inicial do programa *Acceleration*.



Figura 3: Tela de gráficos do *Acceleration*, mostrando a aceleração, velocidade e posição em uma queda livre.

O significado da calibração deve ser discutido com cuidado. Ao se pressionar o botão “Calibrate”, o programa registra a aceleração em cada eixo nesse instante e passa a subtraí-la dos resultados subsequentes (por isso dizemos que o acelerômetro é “zerado”). Normalmente o *smartphone* ou *tablet* não estará acelerado no momento da calibração, de modo que apenas a aceleração da gravidade é subtraída. Isso significa que daí em diante o programa

apresentará a grandeza

$$\vec{a}'' = \vec{a}' - \vec{g} = (\vec{g} - \vec{a}) - \vec{g} = -\vec{a}. \quad (2)$$

A menos do sinal, essa é a aceleração do aparelho (o sinal pode ser ignorado imaginando-se que os eixos da figura 1 são invertidos).

É importante notar que a equação $\vec{a}'' = -\vec{a}$ só vale se o aparelho não estiver em rotação. Se a orientação dos eixos mudar com o tempo, o que ficará registrado será, componente a componente,

$$\begin{aligned} a''_x &= g_x - a_x - g_x^0, \\ a''_y &= g_y - a_y - g_y^0, \\ a''_z &= g_z - a_z - g_z^0, \end{aligned} \quad (3)$$

onde $g_{x,y,z}^0$ são as componentes da aceleração da gravidade nas direções em que os eixos do aparelho apontavam no instante da calibração. Como essas direções estão mudando, $g_{x,y,z}^0 \neq g_{x,y,z}$ e não há cancelamento entre esses valores. Assim, quando o movimento do acelerômetro envolve rotações, a “calibração” pode mais atrapalhar que ajudar.

2 Queda livre

O experimento mais simples que pode ser feito com o acelerômetro é, provavelmente, a “queda livre”. Para realizá-lo em sala de aula basta subir em uma cadeira (ou na mesa do professor), iniciar a gravação dos dados do acelerômetro e deixar o *tablet/smartphone* cair, não sem antes pedir que um par de alunos estique um pano (uma camisa serve) para aparar o dispositivo sem danificá-lo. A figura 4 mostra a aceleração medida em um desses experimentos. Note que o programa utilizado foi o *Acceleration* e que a aceleração é dada em unidades de g . Pode-se ver que a aceleração do *tablet/smartphone* manteve-se constante e igual a g durante a queda. A “calibração” disponível no programa foi usada; sem ela, como já mencionamos, encontraríamos aceleração zero durante a queda livre.

O experimento põe a teste de maneira particularmente simples uma das ideias mais discutidas no ensino médio, a de que corpos em queda livre têm aceleração constante. Apesar da importância desse tema e do tempo dedicado a ele nos cursos introdutórios de física, poucos experimentos sobre a queda livre costumam ser realizados em sala de aula. Como vimos, *tablets* e *smartphones* podem ajudar a preencher essa lacuna.

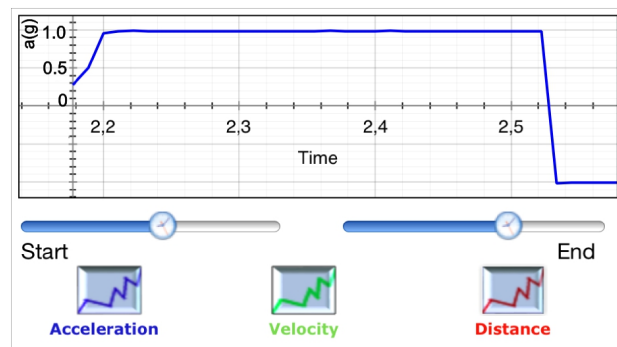


Figura 4: Aceleração em função do tempo no experimento de queda livre.

As figuras 5 e 6 mostram a velocidade e posição do dispositivo durante o experimento, conforme calculada pelo *Acceleration*. É interessante notar que a comparação entre os diferentes gráficos torna possível discutir as variações (linear e quadrática) da velocidade e posição com o tempo quando a aceleração é constante, um tópico importante no ensino médio.

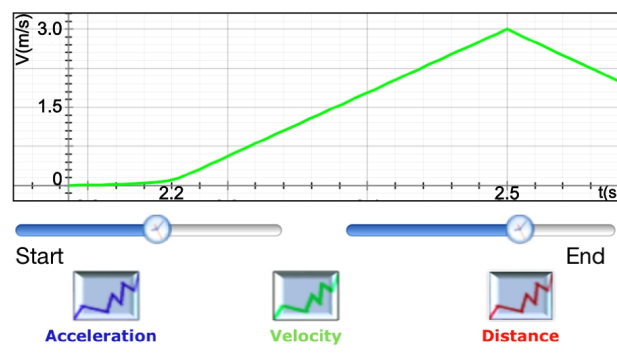


Figura 5: Velocidade (calculada) em função do tempo no experimento de queda livre.

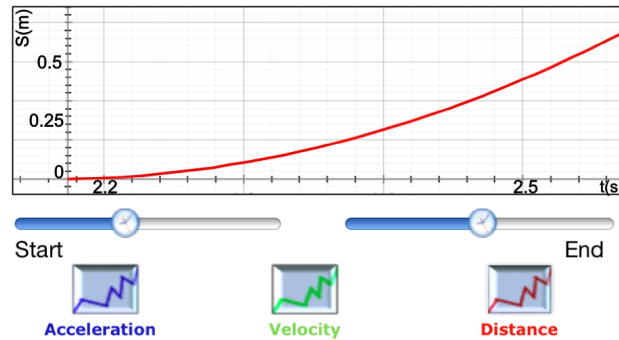


Figura 6: Posição (calculada) em função do tempo no experimento de queda livre.

A análise de gráficos como os mostrados acima permite discutir com os alunos questões como:

- (i) Quanto tempo o *tablet/smartphone* ficou no ar?
- (ii) Qual a da altura da queda?
- (iii) A aceleração do dispositivo permaneceu constante durante todo o movimento?
- (iv) Se deixarmos cair um *tablet* e um *smartphone*, qual terá maior aceleração?

3 O paraquedas

Um desenvolvimento natural do experimento de queda livre é o estudo dos efeitos de resistência do ar. Para fazer isso, podemos retomar o experimento anterior, dessa vez colocando o *smartphone* sobre uma placa de isopor (ver a figura 7) de modo a aumentar a resistência que o ar oferece à queda. As dimensões da placa que usamos no experimento descrito a seguir eram $30,0 \times 50,0 \times 1,5$ cm.

Como no experimento de queda livre, zeramos o acelerômetro, iniciamos a gravação dos dados e deixamos o isopor cair (com o *smartphone* em cima). Se o *smartphone* estiver aproximadamente no centro da placa a queda será estável, ou seja, o isopor não vira, derrubando o aparelho (fizemos inúmeras repetições desse experimento e nenhum acidente foi registrado). O resultado



Figura 7: O *smartphone* apoiado na placa de isopor.

de uma medida realizada dessa maneira está mostrado na figura 8. O programa utilizado para ler o acelerômetro nesse experimento foi o *Sparkvue*. Podemos notar que a aceleração no início da queda é aproximadamente igual à da gravidade ($\approx 0,8g$), e seu valor diminui gradativamente à medida que o tempo passa, tendendo a zero. A diferença entre a aceleração da gravidade e a aceleração medida deve-se à resistência do ar sobre a placa de isopor. Vê-se da figura 8 que essa resistência aumenta com o tempo, até praticamente igualar-se à ação da gravidade no final da queda, quando a aceleração medida tende a zero.

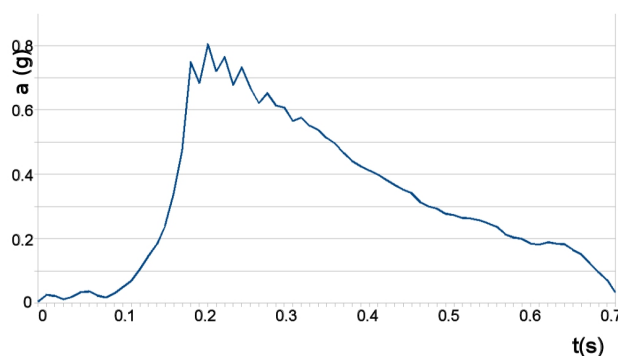


Figura 8: Aceleração durante a queda do *smartphone* colocado sobre a placa de isopor.

O cálculo da velocidade a partir da aceleração permite analisar como a resistência do ar depende dessa velocidade. O resultado de uma análise desse tipo está mostrado no gráfico da figura 9, no qual podemos ver que a resistência do ar aumenta com a velocidade.

O conceito de velocidade limite também pode ser explorado com esse experimento. Como mencionamos ao analisar a figura 8, em algum momento próximo ao término de nossa medição a resistência do ar praticamente cancela

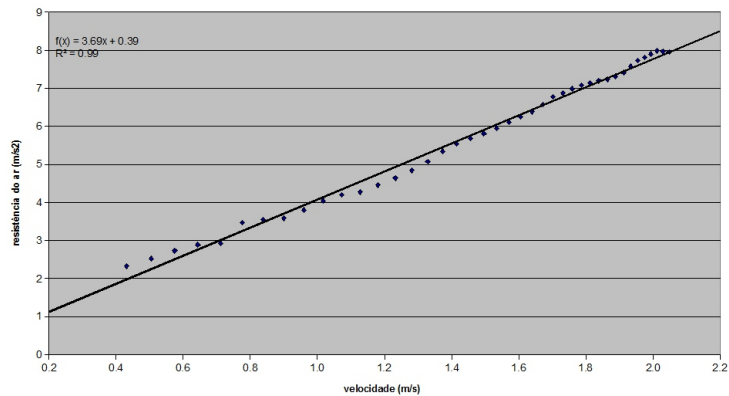


Figura 9: Aceleração devida à resistência do ar ($g - a$ em m/s^2) durante a queda do *smartphone* apoiado em uma plataforma de isopor, como função da velocidade.

a ação da gravidade. Portanto, daí em diante a velocidade deveria ficar constante, pois chegamos a uma situação de equilíbrio.

Uma extensão do experimento consiste em prender um pequeno paraquedas ao *smartphone* (figura 10) e deixá-lo cair de um lugar alto (por exemplo o 2º andar da escola, sem esquecer de apará-lo com um pano estendido). A aceleração registrada pelo acelerômetro num experimento desse tipo está mostrada na figura 11.



Figura 10: O *smartphone* acoplado a um paraquedas caseiro.

As regiões *a*, *b* e *c* no gráfico da figura 11 representam, respectivamente, o aparato antes de ser solto, o período em que o paraquedas está se abrindo

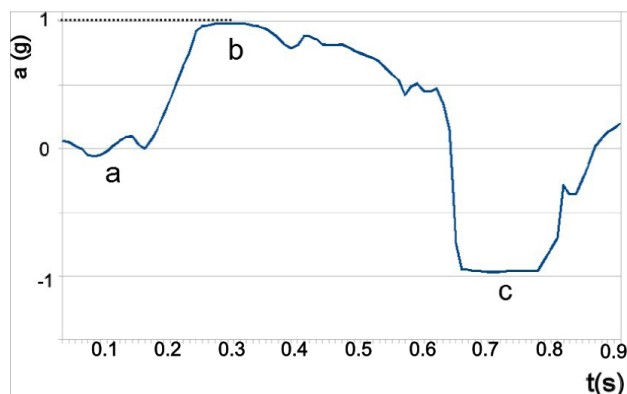


Figura 11: A aceleração em função do tempo do *smartphone* em queda com paraquedas.

e, finalmente, o paraquedas totalmente aberto. Note que nessa ultima região temos uma aceleração negativa, o que indica que a força resultante está para cima, freando o conjunto. Isso mostra que quando o paraquedas se abre o *smartphone* está a uma velocidade maior que a limite, e portanto a resistência do ar será maior que a força peso, diminuindo a velocidade do conjunto até que ambas as forças se igualem gerando uma situação de equilíbrio. A grande aceleração para cima (negativa) que surge quando o paraquedas se abre completamente é bem conhecida dos paraquedistas, que a chamam de *tranco*. O *plateau* em $-1g$ visto na região *c* do gráfico da figura 11 reflete a limitação do acelerômetro ao intervalo $\pm 2g$. Ao “zerarmos” o sensor somamos g à aceleração medida, o que produz um intervalo de leitura de $-g$ a $3g$.

É importante ressaltar como o resultado do experimento confronta a ideia da maioria dos alunos de que a aceleração é sempre para baixo.

4 O *tablet* num carrinho

Muitos experimentos interessantes podem ser realizados colocando-se o *tablet/smartphone* sobre um carrinho. Construimos esse carrinho prendendo quatro rodas de *skate* sob uma plataforma desenhada para receber e proteger um *tablet*. O resultado da montagem foi chamado de *iCar* pelos alunos e está mostrado na figura 12.



Figura 12: O *iCar*: o carrinho de brinquedo que transporta um *tablet*.

Como primeira aplicação do *iCar* estudamos um simples empurrão sobre o carrinho. O resultado de uma medida pode ser visto na figura 13, que mostra a aceleração durante o empurrão que pôs o carrinho em movimento (região *a* do gráfico) e o deslocamento posterior (região *b*). Após um tempo o *iCar* foi freado; essa desaceleração corresponde à região *c*.

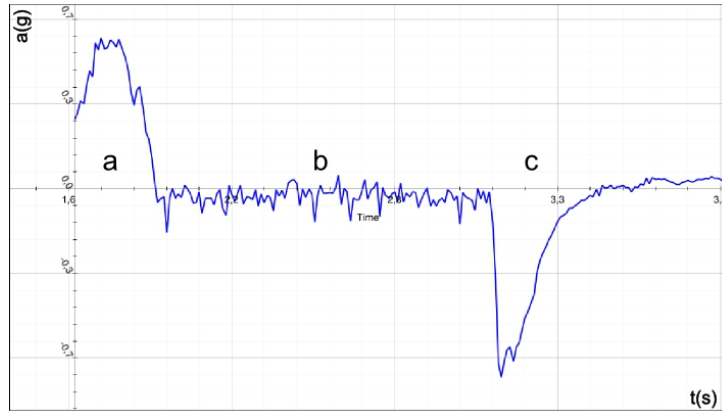


Figura 13: Aceleração durante o empurrão (*a*), deslocamento (*b*) e frenagem (*c*) do *iCar*.

Pode-se notar o fato do empurrão acelerar rapidamente o *iCar* (cerca de 0,2 s). No intervalo entre o impulso inicial e a frenagem final (a região *b* da figura 13) é possível notar que o carro sofre uma pequena desaceleração, provavelmente em consequência de forças dissipativas. Isso é facilmente observado no gráfico da velocidade em função do tempo mostrado na figura 14.

É interessante comparar as duas possibilidades de fazer o carro parar: uma frenagem como a que ocorreu no final do movimento, que gera uma forte desaceleração, ou o atrito que, embora pequeno, mais cedo ou mais tarde deixaria o carro com velocidade zero.

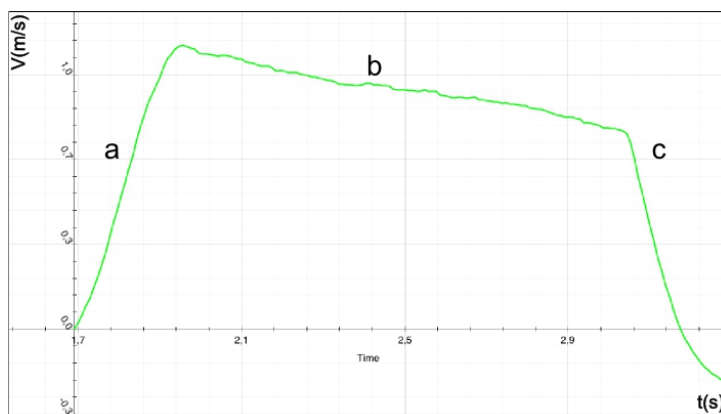


Figura 14: A velocidade (calculada) do *iCar* durante o empurrão, movimento e frenagem.

É possível propor aos alunos muitas atividades que explorem esse experimento. Por exemplo:

(i) A partir do gráfico da aceleração do móvel (figura 13), faça um diagrama de forças para o *iCar* nas regiões *a*, *b* e *c*.

(ii) Analisando o gráfico da velocidade em função do tempo, estime a velocidade do *iCar* quando a mão do professor perde o contato com ele.

(iii) Você seria capaz de estimar essa velocidade sem o auxílio do gráfico de velocidade?

(iv) A partir do gráfico de aceleração estime o valor da força de atrito na região *b*.

(v) Faça uma estimativa da distância entre o professor (que empurrou o *iCar*) e o aluno (que parou o carro).

O objetivo dessas propostas não é criar um roteiro de tarefas para acompanhar o experimento. O propósito é sugerir temas que podem ser desenvolvidos de maneira proveitosa, como a união de conceitos da cinemática com a segunda lei de Newton.

Para fazer uma experiência como essa não é necessário montar um carrinho “sofisticado” como o *iCar*. A mesma ideia pode ser implementada com o *skate* de um aluno, por exemplo. Pudemos observar resultados semelhantes prendendo o *tablet* (protegido com uma capa comercial) ao *skate* com uma fita adesiva.

5 A segunda lei de Newton

Qualitativamente, a segunda lei de Newton diz que forças causam acelerações (e não velocidades, como pensava Aristóteles). Isso foi observado no experimento da seção anterior, em que o *iCar* era acelerado por “empurrões”. Mas como mostrar que a relação quantitativa entre força e aceleração é linear? Podemos fazer isso com auxílio de um dinamômetro de mola, com o qual estudamos a aceleração impelida ao *iCar* por uma força dada. O experimento é muito simples e está esquematizado na figura 15: afixamos uma das extremidades do dinamômetro na mesa do professor e a outra no *iCar*, distendemos o dinamômetro até atingir determinado valor da força e em seguida soltamos o carro, registrando a aceleração com o acelerômetro.

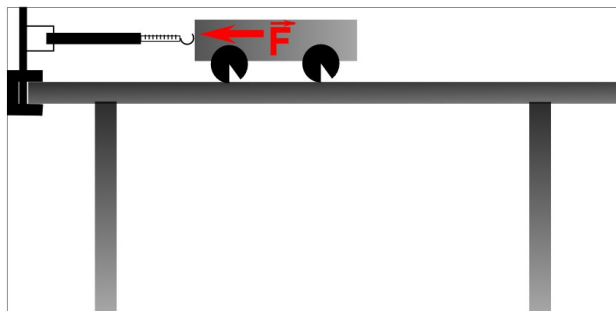


Figura 15: O *iCar* preso a um dinamômetro.

Repetindo esse procedimento para vários valores distintos da força, obtemos gráficos da aceleração em função do tempo como os mostrados na figura 16. Como era de se esperar, em cada caso temos uma aceleração que varia com o tempo, pois a força exercida pelo dinamômetro diminui à medida que sua mola volta à posição de equilíbrio. A aceleração inicial do carrinho,

relacionada à força registrada pelo dinamômetro, pode ser estimada a partir do valor máximo da aceleração em cada curva. Um gráfico dessas medidas – força *versus* aceleração máxima – está mostrado na figura 17. Os pontos são os resultados das medidas e a linha representa o ajuste de uma reta a esses dados. O ajuste confirma que a força é linearmente proporcional à aceleração. Mais ainda, o coeficiente angular da reta ajustada é 1,63 kg, muito semelhante à massa do conjunto *iCar+smartphone*, que era de 1,54 kg (uma diferença de 5,8%).

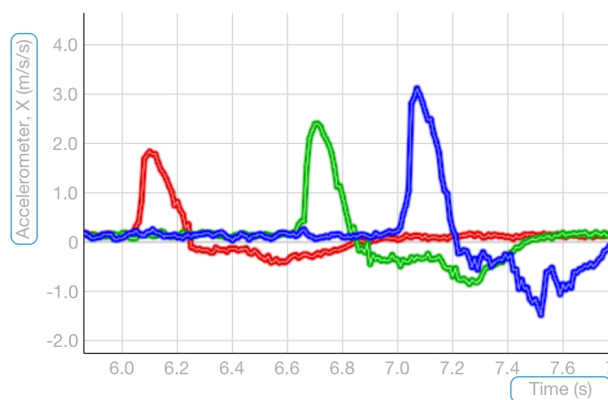


Figura 16: Acelerações impelidas ao *iCar* por diferentes forças.

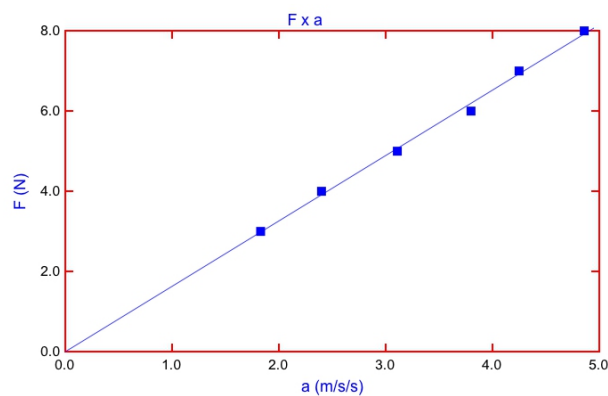


Figura 17: Gráfico da força registrada no dinamômetro em função da aceleração máxima do carrinho. Os pontos são as medidas efetuadas e a linha é um ajuste linear aos dados.

Uma extensão interessante do experimento pode ser realizada alterando-se a massa, mantendo-se fixa a força.

6 O plano inclinado

O plano inclinado é um dos temas prediletos no ensino de mecânica. Geralmente ele é abordado de maneira puramente teórica (e chata, segundo muitos alunos), sem apoio de experimentos quantitativos. Com o *iCar* – ou qualquer carrinho capaz de carregar um *tablet/smartphone* – é possível realizar experimentos sobre o movimento em planos inclinados, colocando os resultados teóricos a teste. Para isso, um plano inclinado pode ser construído, por exemplo, apoiando a mesa do professor sobre uma cadeira, como esquematizado na figura 18.

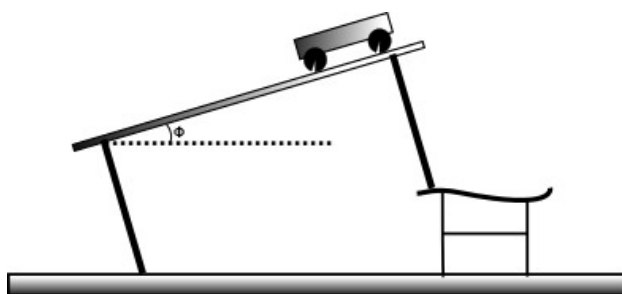


Figura 18: O plano inclinado com o *iCar*.

O ângulo de inclinação ϕ do plano pode ser determinada com o próprio acelerômetro, uma vez que vários programas de leitura desse sensor são capazes de indicar a inclinação do aparelho em relação à direção vertical. Escolhemos o *Accelmeter*, que pode ser obtido gratuitamente na loja virtual da Apple e tem entre suas funções a medida de “nível”. Em um experimento, após inclinar a mesa, o *iCar* foi colocado sobre ela e segurado por um obstáculo. A inclinação foi medida com o *Accelmeter*, com o resultado $\phi = 14,5^\circ$ (figura 19). O passo seguinte foi retirar o obstáculo que segurava o carro e medir a aceleração do movimento. O resultado encontrado está na figura 20. Do gráfico vemos que aceleração do *iCar* foi de aproximadamente $2,3 \text{ m/s}^2$.



Figura 19: Medida do ângulo com o *Accelmeter* colocado sobre a mesa inclinada.

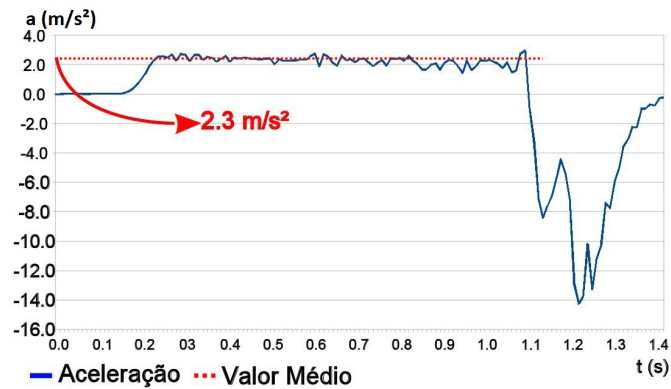


Figura 20: Gráfico da aceleração do dispositivo deslizando sobre a mesa inclinada.

Desprezando atritos e a inércia de rotação das rodas a aceleração do carrinho seria

$$a = g \sen(14.5^\circ) = 2,4 \text{ m/s}^2 . \quad (4)$$

Esse valor está muito próximo da aceleração medida: a discrepância é da ordem de 4% e provavelmente deve-se ao efeitos desprezados no cálculo (dissipação e momento de inércia das rodas).

Uma extensão do experimento pode ser motivada pela pergunta: “se aumentarmos a massa do *iCar* e o deixarmos descer o plano inclinado, o que ocorrerá com a aceleração?”. O acréscimo de algum objeto pesado ao *iCar* permitirá responder essa questão experimentalmente.

Outra variação simples e instrutiva do experimento consiste em empurrar o *iCar* ladeira acima e o aparar de volta (ver a figura 21).

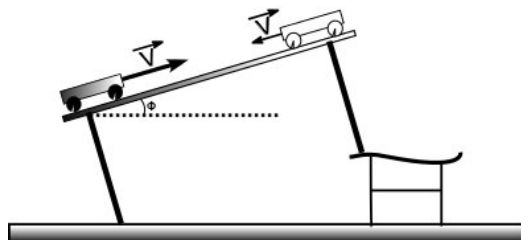


Figura 21: Subida e descida do *iCar* em uma mesa inclinada.

Essa versão do experimento permite a releitura de uma questão clássica, que revela quão grandes são as dificuldades enfrentadas pelos alunos na aprendizagem de mecânica. A questão é: quando jogamos uma bolinha para cima, o que acontece com a sua aceleração no ponto mais alto da trajetória? É bem sabido pelos professores de cursos introdutórios de física que grande parte dos alunos diz que a aceleração do corpo é zero no alto da trajetória. Concepções intuitivas e um mau entendimento de conceitos de cinemática e da segunda lei de Newton levam esses alunos a não admitir que um corpo com velocidade zero possa ter aceleração não nula.

O resultado do experimento pode ser visto figura 22). É interessante pedir aos alunos que indiquem o instante em que o valor a aceleração assume o valor zero.

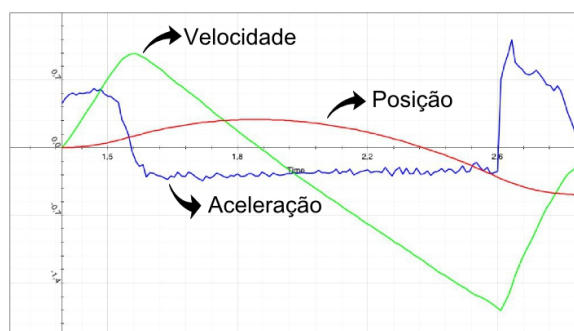


Figura 22: Aceleração, velocidade e posição do *iCar* durante a subida e descida em uma mesa inclinada.

7 A máquina de Atwood

Outro tópico popular nos cursos de física básica é a máquina de Atwood. Esse é um sistema com muitas aplicações práticas, e seu estudo envolve temas importantes como a terceira lei de Newton e as forças transmitidas por fios e cabos. A montagem experimental de uma máquina de Atwood pode ser vista na figura 23 e é muito simples. Usamos pratos de balança (dessas de peixeiro) e uma rodinha de *skate* serviu como roldana. Em um dos pratos colocamos um *smartphone* e no outro um conjunto de pesos.



Figura 23: Montagem da máquina de Atwood feita em sala de aula.

O resultado da medida da aceleração pode ser visto na figura 24. A aceleração do *smartphone* foi de aproximadamente $1,12 \text{ m/s}^2$ (para cima).

O cálculo teórico, desprezando atritos e a inércia da roldana, leva a

$$a = \frac{M - m}{M + m} g \quad (5)$$

onde m é a massa do *smartphone*, M é a massa do corpo do lado oposto e g a aceleração da gravidade. Utilizando os valores das massas o resultado é $1,25 \text{ m/s}^2$. Esse valor é bastante próximo ao medido, $1,12 \text{ m/s}^2$, uma diferença de 10% que provavelmente deve-se ao atrito e o momento de inércia da roldana.

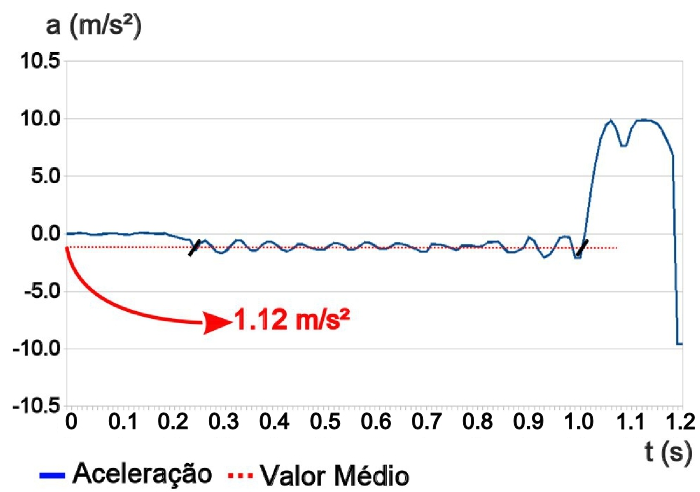


Figura 24: Gráfico da aceleração em função do tempo na máquina de Atwood.

8 A tração é igual ao peso?

Essa montagem é uma variação da máquina de Atwood e consta como exercício em incontáveis livros didáticos, revelando algumas dificuldades comuns no estudo da mecânica. Temos uma plataforma (uma mesa), uma roldana presa ao tampo da mesa por uma haste metálica e uma linha ligando uma massa ao *iCar* (ver figura 25). Um esquema do experimento está na figura 26.

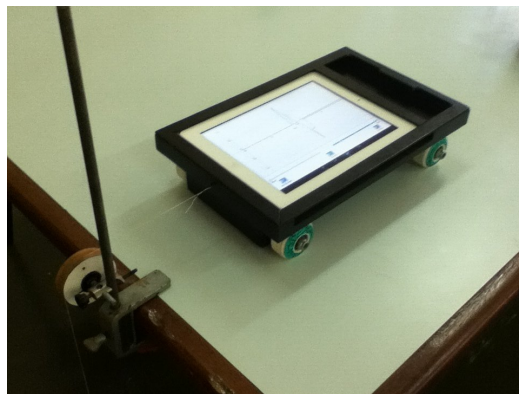


Figura 25: O *iCar* preso a uma massa com auxílio de uma roldana.

A figura 27 mostra o gráfico gerado durante o movimento do carrinho, e podemos ver que a aceleração foi de aproximadamente $1,3 \text{ m/s}^2$.

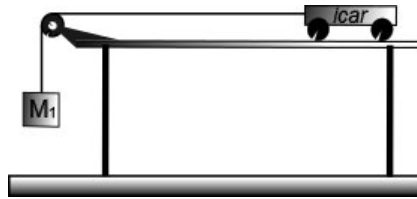


Figura 26: Esquema da montagem experimental.

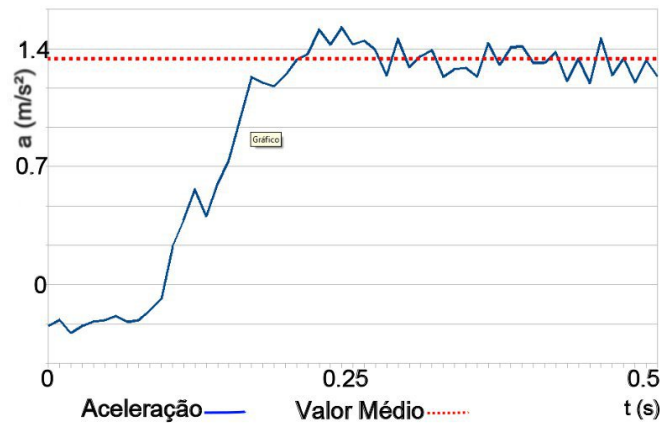


Figura 27: Aceleração do *iCar* puxado por um peso.

Aplicando a segunda lei de Newton ao sistema carrinho-massa, a aceleração do *iCar* deve ser (desprezando os atritos e inércias de rotação)

$$a = \frac{M_1}{M_1 + M}g \quad (6)$$

onde M_1 é a massa que traciona o fio, M é a massa do *iCar* e *tablet* juntos, e g é a aceleração da gravidade. No experimento realizado tinha-se $M_1 \approx M/6$, o que leva à previsão de que $a \approx 1,4 \text{ m/s}^2$, em razoável acordo com o experimento.

Um erro muito comum cometido pelos alunos é tomar a tensão na corda como sendo igual ao peso de M_1 . No caso estudado isso leva à previsão de que a aceleração do carrinho seria $a = (M_1/M)g \approx 1,6 \text{ m/s}^2$, um resultado bastante diverso do encontrado experimentalmente.