

Independência da massa e modelagem newtoniana para a translação de objetos acelerados em cenários de investigação aberta

RESUMO

Erick dos Santos Silva

ssf.erick@gmail.com

orcid.org/0000-0002-5009-2914
Instituto Federal de Educação,
Ciência e Tecnologia do Rio de
Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil

**Alexandre Alberto Visentin
Ramos de Araújo**

alexandrevisentin@gmail.com

orcid.org/0000-0003-0996-7472
Colégio Militar de Juiz de Fora, Juiz
de Fora, Brasil

A análise de objetos que descem rampas apoiados sobre rodas frequentemente é realizada por meio de uma associação com modelos que descrevem objetos deslizantes, o que pode causar confusões para estudantes que iniciam suas investigações em física. A mesma dificuldade costuma ocorrer quando se tenta justificar que a aceleração de um objeto deslizante ao longo de uma rampa, sem atrito, não é influenciada por sua massa. Esses problemas podem ser minimizados quando consideramos um cenário de modelagem aberta, onde hipóteses estruturantes podem ser consideradas e avaliadas por meio de um processo de validação experimental. O que seria deslizar sem atrito? Em que medida podemos aproximar o movimento de translação de um objeto que desliza em contato macroscópico com uma rampa de outro que tem contato realizado por meio de rodas? No presente trabalho, apresentamos um experimento que utiliza as técnicas de videoanálise para investigar precisamente essas questões, podendo ser implementado nos espaços escolares usuais, sem necessidade de grandes intervenções. A proposta pode ser utilizada para aproximar estudantes de investigações técnicas e modelagens em perspectiva aberta, em diálogo com as demandas científicas e tecnológicas atuais.

PALAVRAS-CHAVE: Videoanálise; Teste de hipóteses físicas; Investigação experimental.

INTRODUÇÃO

Os vídeos são amplamente utilizados na dinâmica social contemporânea, estando presentes nas interações cotidianas das redes sociais, em dispositivos de segurança modernos, em análises periciais e investigações científicas em geral (DE JESUS, 2014; SILVA; LIMA, 2017; 2019; DE JESUS; SAZAKI, 2021). Essa aproximação genuína com os vídeos pode ser utilizada para inserir os estudantes em ambientes de modelagem científica por meio da análise de vídeos, o que tem sido chamado na literatura recente de videoanálise. As técnicas de videoanálise permitem estudos criteriosos de fenômenos físicos, servindo de suporte técnico-científico para investigações e aplicações em diversas áreas científicas, tecnológicas e sociais (DE JESUS, 2017; SILVA, 2018).

Por outro lado, observamos que discussões científicas realizadas em ambientes acadêmicos frequentemente ocorrem em formatos predominantemente teóricos, com as atividades experimentais exibindo um papel de menor destaque, muitas vezes conectadas a uma perspectiva de suporte às discussões teóricas regulares, que configuram a maior parte da carga horária de diversos cursos com perfil científico-tecnológico (NOGUEIRA; HERNANDES, 2021; OLIVEIRA *et al.*, 2022; FRANÇA; LOPEZ, 2022). Atividades de manipulação instrumental e investigações em perspectivas mais abertas, necessárias para o desenvolvimento de diversas habilidades demandadas pela dinâmica científica atual, são relatadas pela literatura como exemplos raros nos espaços escolares, sobretudo se pensarmos no ensino de nível médio (DE JESUS, 2017; NOGUEIRA; HERNANDES, 2021; OLIVEIRA *et al.*, 2022; FRANÇA; LOPEZ, 2022).

Buscando a viabilização desses espaços mais genuínos de investigação e modelagem científico-tecnológica, o presente trabalho propõe uma estratégia experimental baseada na promoção de cenários criteriosos de modelagem aberta, o que pode contribuir, numa perspectiva didática, para a ampliação das discussões teóricas realizadas em espaços acadêmicos usuais, considerando o seu entrelace com as questões práticas e tecnológicas associadas (POZO; CRESPO, 2009; SILVA; SASSERON, 2020). Apresentamos uma análise experimental que permitiu determinar a independência da massa em um movimento acelerado, com medidas compatíveis entre si e erros relativos menores que 1% (VUOLO, 1996; SILVA, 2018). O desvio percentual em relação a um modelo newtoniano associado também é analisado e apresentado, com as justificativas experimentais cuidadosamente destacadas (VUOLO, 1996; SILVA, 2018). Veremos que modelagens tipicamente encontradas em obras didáticas nacionais admitem hipóteses estruturantes que não costumam ser explicitadas e, quando não observadas, podem comprometer o poder preditivo assumido nesses modelos. O experimento apresentado pode ser adaptado para investigação de outras hipóteses estruturantes, pois se baseia em cenários de investigação aberta (POZO; CRESPO, 2009; SILVA; SASSERON, 2020).

ARRANJO EXPERIMENTAL E VIDEOANÁLISE

OBJETIVO INVESTIGATIVO E ARRANJO EXPERIMENTAL

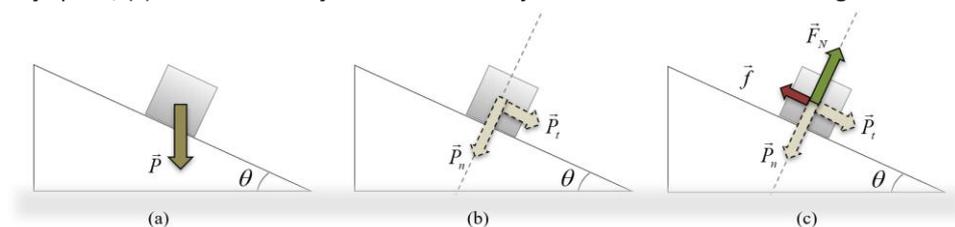
O arranjo experimental foi estruturado para avaliar duas principais questões: (1) se a independência da massa na aceleração de um objeto que desce uma rampa com inclinação definida θ pode ser verificada por meio de uma videoanálise acessível e (2) se os modelos tipicamente encontrados nas principais obras adotadas nacionalmente podem ser associados a objetos que transladam apoiados sobre rodas. Essa última associação é realizada com frequência nos textos e problemas propostos, apesar do limite de validade contíguo nem sempre ser destacado.

De fato, existem abordagens teóricas realizadas em obras didáticas de grande circulação no cenário nacional (RAMALHO, 2007; HALLIDAY, 2008; DOCA; BISCOLOLA; BÔAS, 2016), envolvendo objetos descendo rampas de inclinação θ . A análise dinâmica é realizada considerando um modelo newtoniano para descrever a força resultante que atua no centro de massa (CM) do objeto de massa m que translada ao longo da rampa, que pode ser apresentada matematicamente na forma:

$$\vec{P}_t - \vec{f} = m\vec{a}, \quad (1)$$

onde \vec{P}_t representa a componente tangencial da força peso na direção do movimento, \vec{f} uma força de resistência considerada constante e no sentido oposto à tendência de movimento ao longo da rampa e, \vec{a} , a aceleração associada (**Figura 1**).

Figura 1 - Esquema representando um objeto deslizando em uma rampa: (a) destaque para a força peso que atua no objeto deslizando; (b) componentes tangencial e normal da força peso; (c) síntese das forças atuantes no objeto consideradas na modelagem



Fonte: Elaborada pelos autores.

Observe que a relação (1) pode ser escrita na forma:

$$P \text{sen}\theta \hat{x} - f \hat{x} = m a \hat{x}, \quad (2)$$

sendo \hat{x} um vetor unitário na direção do movimento, orientado no sentido de deslocamento do móvel. Isso permite escrever um formato escalar equivalente dado por:

$$P \text{sen}\theta - f = ma, \quad (3)$$

e, expressando-se a aceleração a , obtém-se:

$$a = g \text{sen}\theta - f/m. \quad (4)$$

Considerando um arranjo experimental onde seja possível minimizar ou desprezar as forças de resistência – que não são necessariamente constantes – é possível reescrever a relação (4) fazendo o termo f/m tender a zero. Nessa situação ideal de resistência nula, obtém-se:

$$a = g \operatorname{sen}\theta, \quad (5)$$

indicando que a aceleração modelada para o centro de massa do móvel ao longo da rampa não depende de sua massa. É importante frisar que a hipótese de rolamento sem deslizamento, assim como a hipótese de que podemos desprezar as forças de resistência devem ser consideradas para associar o modelo anterior ao experimento executado, uma vez que o contato macroscópico do carrinho com a rampa não é direto, mas realizado por meio de rodas (DE JESUS; SASAKI, 2014). A discussão do experimento permite avaliar o alcance dessas hipóteses experimentais, comumente realizadas nas obras didáticas nacionais mais adotadas para o ensino médio e superior (DE JESUS; SASAKI, 2014), juntamente com a qualidade preditiva dessa modelagem quando avaliada em uma situação realística.

Observe que, por outro lado, a condição de aceleração constante expressa pela relação (4) implica que as posições x ao longo da rampa devem obedecer a uma relação funcional quadrática com o tempo. Matematicamente, devemos ter:

$$x(t) = x_0 + v_0 t + at^2/2 \quad (6)$$

que para móveis abandonados a partir do repouso ($v_0 = 0$) resulta em uma aceleração na forma:

$$a = 2\Delta x/t^2 \quad (7)$$

onde $\Delta x = x - x_0$ representa o deslocamento do móvel ao longo da rampa e, $\Delta t = t - 0$, o intervalo de tempo transcorrido no deslocamento Δx .

A **Figura 2** sintetiza o arranjo experimental utilizado para a videoanálise: um objeto de massa m é abandonado a partir do repouso em uma rampa de inclinação θ com a horizontal, percorrendo uma trajetória de comprimento Δx em um intervalo de tempo associado Δt . Ao filmarmos um conjunto semelhante de objetos abandonados, mas com massas diferentes, podemos identificar se a aceleração obtida nesses diferentes movimentos é a mesma, dentro dos limites experimentais considerados para a videoanálise. Vale destacar que podemos obter, a partir da videoanálise, os deslocamentos Δx ao longo da rampa, juntamente com os intervalos de tempo associados $\Delta t = t - 0$, que possibilitam avaliar a aceleração por meio da relação (7). Observe ainda que o contato do móvel com a rampa ocorre por meio de rodas, o que demanda assentimento da hipótese de rolamento sem deslizamento.

Figura 2 - Arranjo experimental e principais componentes utilizados na videoanálise



Fonte: Elaborada pelos autores.

PROCEDIMENTOS DE COLETA E ANÁLISE

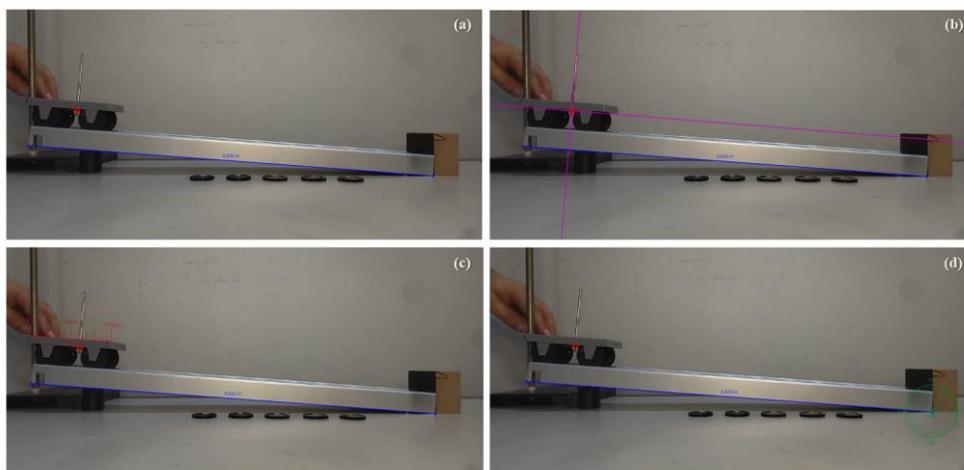
A videoanálise fornece dados de deslocamento (Δx) e intervalo de tempo (Δt) para cada objeto abandonado ao longo da rampa. Variando a massa abandonada, podemos obter as acelerações considerando a relação (7) e os valores experimentais de Δx e Δt . Uma vez obtidas as acelerações para os diferentes movimentos, podemos compará-las com a aceleração prevista dentro da perspectiva newtoniana para um deslocamento sem atrito ao longo da rampa. Os desvios permitem avaliar a hipótese experimental sobre a independência da massa, dentro do limite experimental da videoanálise descrita.

Os vídeos analisados foram obtidos por meio de um *smartphone* padrão com uma taxa de aquisição de 30 *frames* por segundo. A análise dos vídeos foi realizada por meio do *software* livre *Tracker* (TRACKER, 2022), que permite a investigação de movimentos registrados em vídeo com alta precisão, desde que a sequência de *frames* respeite a alguns vínculos de registro necessários, ligados à identificação precisa de distâncias físicas com as respectivas distâncias que compõem o plano de movimento investigado na tela do programa (DE JESUS; SAZAKI, 2021; DE JESUS, 2017; SILVA, 2018; TRACKER, 2022).

A **Figura 3** sintetiza os principais elementos do *Tracker* que podem ser utilizados para a obtenção de estimativas precisas, incluindo a análise de incertezas. Na **Figura 3a**, destacamos o fator de escala usado para calibrar as distâncias reais com as distâncias do plano de movimento apresentado em tela pelo *software*. O comprimento da própria rampa (500 mm) pôde ser considerado para este fim. Já na **Figura 3b**, indicamos o eixo de referência utilizado para a análise do movimento ao longo da rampa. Adotamos um ponto do móvel, no instante inicial do primeiro abandono, como origem do sistema de coordenadas – ou seja, o ponto $(x, y) = (0,0)$ do plano de movimento – fazendo coincidir também o eixo x do sistema com a direção do movimento ao longo da rampa. Na **Figura 3c**, destacamos uma ferramenta de medida que permite avaliar distâncias no plano de movimento a partir do fator de escala fornecido. Dessa forma, conhecendo-se duas medidas físicas, podemos inserir uma no processo de calibração e verificar o valor retornado pelo *software* para a outra, o que permite avaliar a incerteza envolvida nas estimativas de grandezas lineares pelo *software*.

Por fim, a **Figura 3d** apresenta uma ferramenta de medida semelhante àquela apresentada na **Figura 3c**, mas voltada para a estimativa de grandezas angulares. Analogamente, a ferramenta pode ser utilizada para a avaliação de incertezas angulares (SILVA, 2018).

Figura 3 - A figura destaca elementos estruturantes utilizados no procedimento de análise: a) Ferramenta de calibração e fator de escala; b) Eixo de referência coincidente com a inclinação da rampa; c) Ferramenta para avaliação de incertezas em grandezas lineares; d) Ferramenta para avaliação de incertezas em grandezas angulares



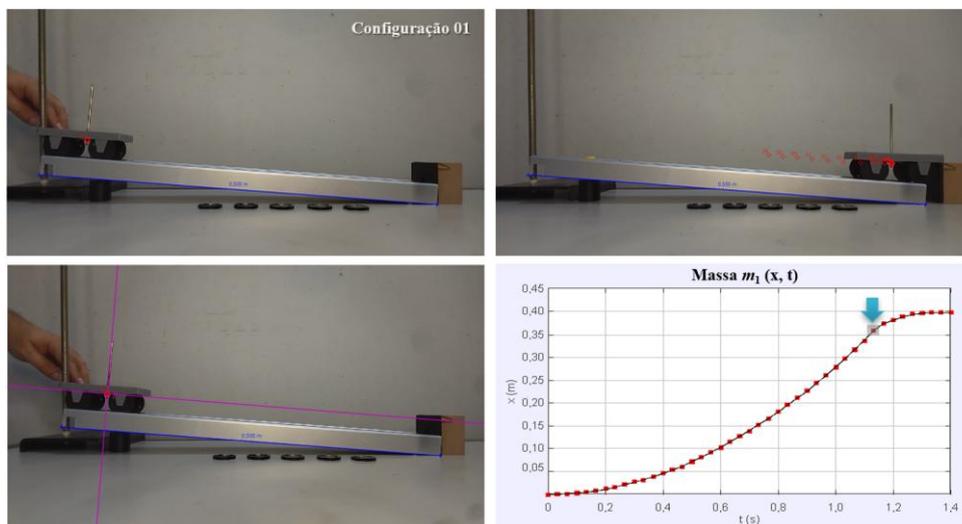
Fonte: Elaborada pelos autores.

ANÁLISE DOS DADOS

DADOS EXPERIMENTAIS E MODELAGEM DO MOVIMENTO ACELERADO

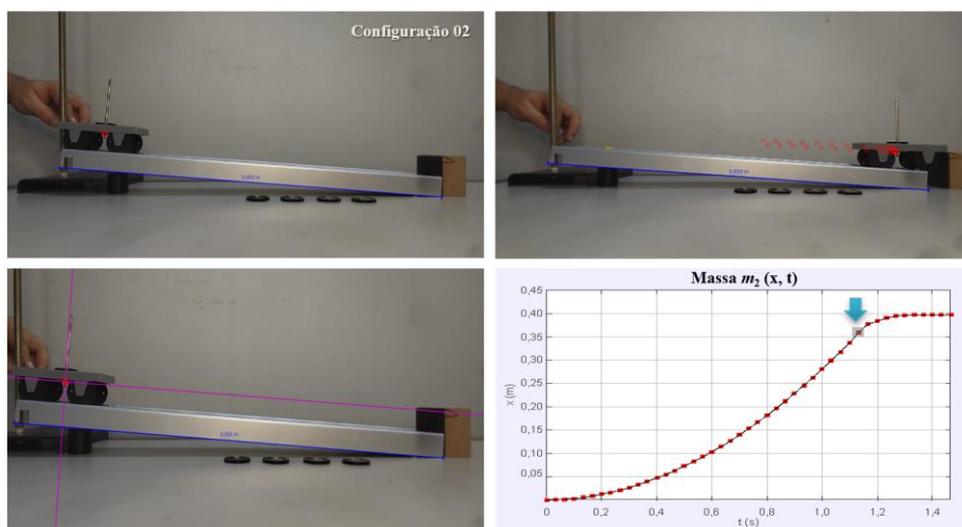
Os vídeos com objetos de diferentes massas sendo abandonados permitem a obtenção de um conjunto de pontos experimentais (x, t) que, por sua vez, possibilitam a aquisição dos deslocamentos do carrinho ao longo da rampa no processo Δx , juntamente com os respectivos intervalos de tempo Δt gastos nestes percursos. Com essas informações podemos, a partir da relação (7), estimar a aceleração do centro de massa do carrinho ao longo da rampa, considerando o modelo newtoniano para a translação do centro de massa discutido na seção anterior (seção 2.1). As **Figuras 4, 5, 6, 7, 8 e 9** sintetizam os seis experimentos realizados com a massa do carrinho variando de 50 g até 100 g. A **Tabela 1** apresenta os dados coletados em cada um dos experimentos.

Figura 4 - a) Carrinho com massa total de 50 g posicionado na rampa de inclinação θ . b) Instante onde o carrinho para após a colisão ocorrida na parte inferior da rampa. c) Eixo de referência considerado na videoanálise. d) Gráfico das posições x em relação ao tempo, com indicação do instante imediatamente anterior à colisão



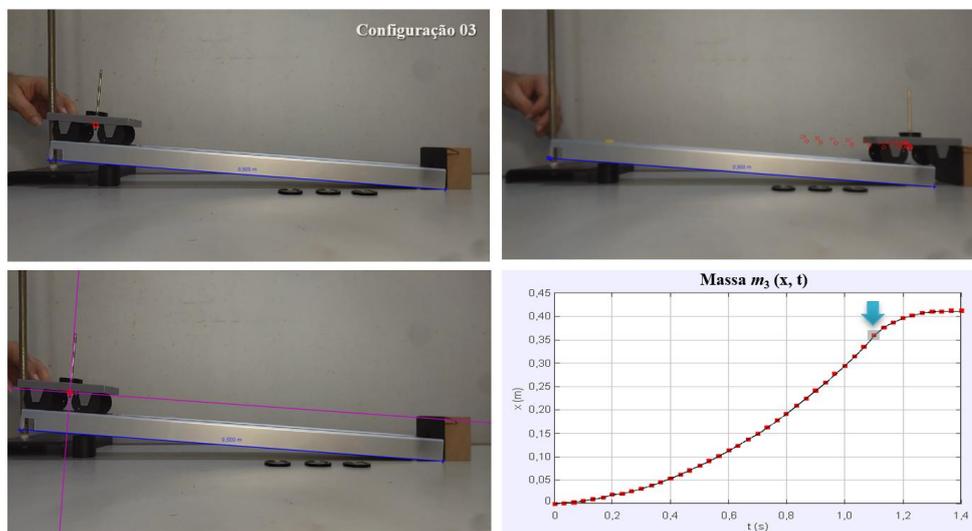
Fonte: Elaborada pelos autores.

Figura 5 - a) Carrinho com massa total de 60 g posicionado na rampa de inclinação θ . b) Instante onde o carrinho para após a colisão ocorrida na parte inferior da rampa. c) Eixo de referência considerado na videoanálise. d) Gráfico das posições x em relação ao tempo, com indicação do instante imediatamente anterior à colisão



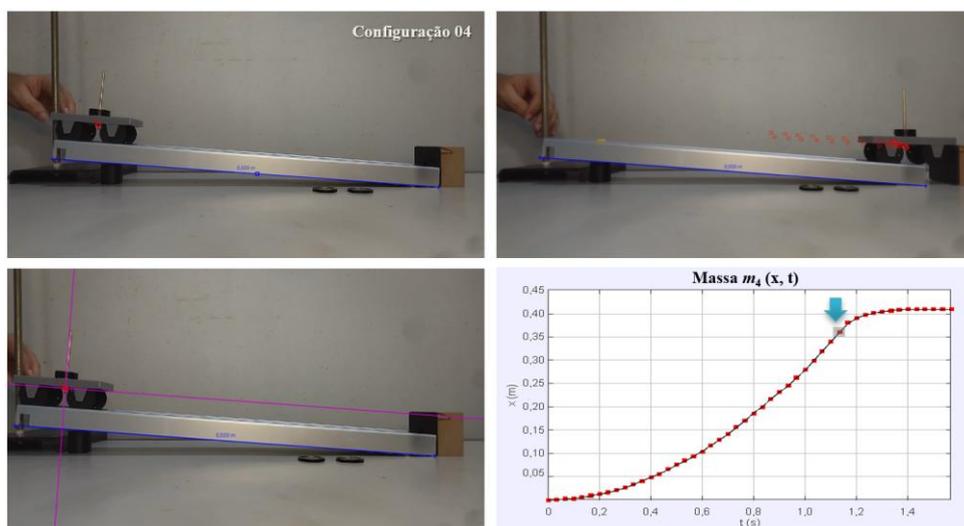
Fonte: Elaborada pelos autores.

Figura 6 - a Carrinho com massa total de 70 g posicionado na rampa de inclinação θ . b) Instante onde o carrinho para após a colisão ocorrida na parte inferior da rampa. c) Eixo de referência considerado na videoanálise. d) Gráfico das posições x em relação ao tempo, com indicação do instante imediatamente anterior à colisão



Fonte: Elaborada pelos autores.

Figura 7 - a) Carrinho com massa total de 80 g posicionado na rampa de inclinação θ . b) Instante onde o carrinho para após a colisão ocorrida na parte inferior da rampa. c) Eixo de referência considerado na videoanálise. d) Gráfico das posições x em relação ao tempo, com indicação do instante imediatamente anterior à colisão.



Fonte: Elaborada pelos autores.

Tabela 1 - Síntese dos dados coletados em cada configuração experimental

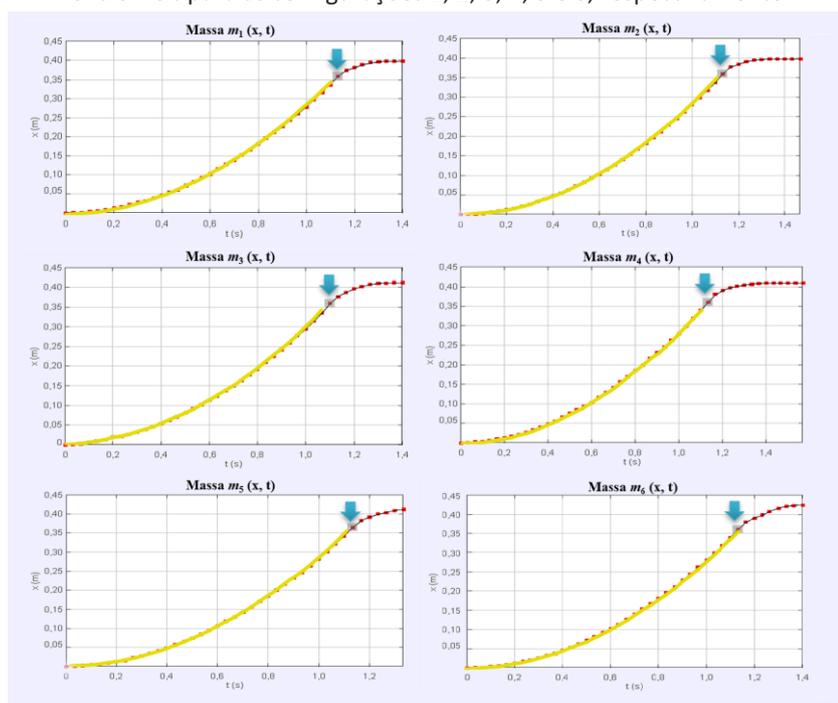
Configuração	m (kg)	θ (°)	Δx (m)	Δt (s)
1	$0,050 \pm 0,001$	$3,3 \pm 0,5$	$0,359 \pm 0,005$	$1,133 \pm 0,005$
2	$0,060 \pm 0,001$	$3,3 \pm 0,5$	$0,359 \pm 0,005$	$1,133 \pm 0,005$
3	$0,070 \pm 0,001$	$3,3 \pm 0,5$	$0,359 \pm 0,005$	$1,133 \pm 0,005$
4	$0,080 \pm 0,001$	$3,3 \pm 0,5$	$0,360 \pm 0,005$	$1,133 \pm 0,005$
5	$0,090 \pm 0,001$	$3,3 \pm 0,5$	$0,364 \pm 0,005$	$1,133 \pm 0,005$
6	$0,100 \pm 0,001$	$3,3 \pm 0,5$	$0,360 \pm 0,005$	$1,133 \pm 0,005$

Fonte: Elaborada pelos autores.

Observe que o carrinho desce a rampa em um movimento acelerado até colidir com um objeto (o aparador) ao final da rampa, o que faz sua velocidade ser reduzida na sequência para zero. Essa observação pode ser realizada qualitativamente em uma inspeção direta no gráfico, pois observamos uma relação funcional parabólica entre x e t até o instante da colisão, onde a partir daí, passamos a observar uma desaceleração do objeto, que pode ser modelada por uma outra relação parabólica de concavidade inversa (**Figuras 4, 5, 6, 7, 8, 9 e 10**).

Quantitativamente, é possível ajustar os pontos experimentais em cada um dos trechos, antes e depois da colisão, obtendo a relação parabólica ajustada com as respectivas acelerações associadas. Vale destacar que a hipótese de aceleração constante após a colisão deve ser avaliada a partir dos dados experimentais, uma vez que as características da colisão não impõem necessariamente este regime de desaceleração constante.

Figura 10 – Linhas de tendência, em amarelo, destacando a relação funcional parabólica entre x e t para as configurações 1, 2, 3, 4, 5 e 6, respectivamente.



Fonte: Elaborada pelos autores.

ACELERAÇÕES OBTIDAS NAS DIFERENTES CONFIGURAÇÕES E INDEPEDÊNCIA DA MASSA

Podemos considerar os dados experimentais e obter a aceleração do centro de massa do carrinho para cada experimento de massa m (**Tabela 2**). A partir daí, uma comparação entre as acelerações obtidas nos permite avaliar experimentalmente a hipótese de independência da massa.

Tabela 2 - Dados de m , Δx , Δt e intensidade de aceleração a estimada para cada configuração experimental

Configuração	m (kg)	Δx (m)	Δt (s)	a (m/s^2)
1	$0,050 \pm 0,001$	$0,359 \pm 0,005$	$1,133 \pm 0,005$	$0,559 \pm 0,009$
2	$0,060 \pm 0,001$	$0,359 \pm 0,005$	$1,133 \pm 0,005$	$0,559 \pm 0,009$
3	$0,070 \pm 0,001$	$0,359 \pm 0,005$	$1,133 \pm 0,005$	$0,559 \pm 0,009$
4	$0,080 \pm 0,001$	$0,360 \pm 0,005$	$1,133 \pm 0,005$	$0,561 \pm 0,009$
5	$0,090 \pm 0,001$	$0,364 \pm 0,005$	$1,133 \pm 0,005$	$0,567 \pm 0,009$
6	$0,100 \pm 0,001$	$0,360 \pm 0,005$	$1,133 \pm 0,005$	$0,561 \pm 0,009$

Fonte: Elaborada pelos autores.

Observe que, de acordo com o modelo newtoniano descrito na seção 2.1, a aceleração do centro de massa ao longo da rampa deve ser independente da massa m do conjunto abandonado, se pudermos minimizar as forças de resistência no processo e considerar a relação (7). Dito em outras palavras, a aceleração do carrinho, nesse modelo, só depende da inclinação θ da rampa com a horizontal, uma vez que podemos considerar a aceleração local da gravidade constante. Para uma mesma inclinação, o modelo implica em uma aceleração comum para configurações de abandono semelhantes que possuem diferentes massas. Considerando, então, a inclinação definida e medida para a rampa (**Tabela 2**), podemos obter, a partir da **Tabela 2**, a intensidade da aceleração média para as diferentes configurações realizadas:

$$a = 0,561 \pm 0,009 \text{ m/s}^2. \quad (8)$$

Comparando as acelerações experimentalmente obtidas com a aceleração teórica esperada (5) para as diferentes configurações de abandono ao longo da rampa, obtemos um desvio percentual da ordem de 1% para todos os casos, conforme resume a **Tabela 3**. Isso aponta para uma validação experimental do modelo newtoniano considerado. Portanto, podemos dizer que o modelo admitido para a translação do centro de massa do carrinho sem atrito ao longo da rampa de inclinação θ é suportado pela videoanálise implementada.

Tabela 3 - Desvio percentual ($\delta\%$) dos módulos das acelerações obtidas nas diferentes configurações experimentais em relação ao modelo newtoniano admitido, onde $a_{\text{modelo}} = 0,564 \text{ m/s}^2$

Configuração	$a \text{ (m/s}^2\text{)}$	$\delta\%$
1	$0,559 \pm 0,009$	0,85
2	$0,559 \pm 0,009$	0,85
3	$0,559 \pm 0,009$	0,85
4	$0,561 \pm 0,009$	0,58
5	$0,567 \pm 0,009$	0,53
6	$0,561 \pm 0,009$	0,58

Fonte: Elaborada pelos autores.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O trabalho revela uma investigação experimental utilizando as técnicas de videoanálise, onde a hipótese de independência da massa na aceleração de um objeto descendo uma rampa é validada, sendo possível avaliar também uma modelagem tipicamente encontrada na literatura para descrever a translação de objetos em contato com a superfície por meio de rodas, explicitando as hipóteses que devem ser observadas quando realizamos tais associações. Observe que o arranjo experimental utilizado permite validar as hipóteses teóricas discutidas com precisão de 1%. Vale destacar que a proposta pode ser utilizada para aproximar estudantes de perspectivas técnicas e abertas de investigação, uma vez que a modelagem promovida permite testes de hipóteses formuladas para eventos realísticos, contribuindo para a inserção de justificativas experimentais na abordagem dos conceitos científicos e tecnológicos demandados pela sociedade moderna.

Mass independence and Newtonian modeling for the translation of accelerated objects in open investigation scenarios

ABSTRACT

The analysis of objects that descend ramps supported on wheels is often performed through an association with models that describe sliding objects, which can cause confusion for students who begin their investigations in physics. The same difficulty often occurs when trying to justify that the acceleration of a sliding object along a frictionless ramp is not influenced by its mass. These problems can be minimized when we consider an open modeling scenario, where structuring hypotheses can be considered and evaluated through an experimental validation process. What would it be like to slide without friction? To what extent can we approximate the translational motion of an object that slides in macroscopic contact with a ramp from another that has contact made by means of wheels? In this work, we present an experiment that uses video analysis techniques to precisely investigate these issues, which can be implemented in usual school spaces, without the need for major interventions. The proposal can be used to bring students closer to technical investigations and modeling in an open perspective, in dialogue with current scientific and technological demands.

KEYWORDS: Video analysis; Physical hypothesis testing; Experimental investigation.

Independencia de masas y modelado newtoniano para la traslación de objetos acelerados en escenarios abiertos de investigación

RESUMEN

El análisis de objetos que descienden por rampas apoyados sobre ruedas se realiza muchas veces a través de una asociación con modelos que describen objetos que se deslizan, lo que puede causar confusión a los estudiantes que inician sus investigaciones en física. La misma dificultad ocurre a menudo cuando se trata de justificar que la aceleración de un objeto que se desliza a lo largo de una rampa sin fricción no está influenciada por su masa. Estos problemas se pueden minimizar cuando consideramos un escenario de modelado abierto, donde las hipótesis de estructuración se pueden considerar y evaluar a través de un proceso de validación experimental. ¿Cómo sería deslizarse sin fricción? ¿En qué medida podemos aproximar el movimiento de traslación de un objeto que se desliza en contacto macroscópico con una rampa de otro que tiene contacto por medio de ruedas? En este trabajo presentamos un experimento que utiliza técnicas de análisis de video para indagar con precisión estos temas, que puede implementarse en espacios escolares habituales, sin necesidad de grandes intervenciones. La propuesta puede ser utilizada para acercar a los estudiantes a las investigaciones técnicas y la modelización en una perspectiva abierta, en diálogo con las demandas científicas y tecnológicas actuales.

PALABRAS CLAVE: Videoanálisis; Pruebas de hipótesis físicas; Investigación experimental.

REFERÊNCIAS

- DE JESUS, V. L. B. Experimentos e videoanálise – Dinâmica, v.1. Livraria da Física, São Paulo, 2014.
- DE JESUS, V. L. B.; SAZAKI, D. G. G. Video analysis using a shaking camera. Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 43, p. e20210296-1-e20210296-3, 2021.
- DE JESUS; V. L. B.; SASAKI, D. G. G. Vídeo-análise de um experimento de baixo custo sobre atrito cinético e atrito de rolamento. Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 36, n. 3, 3503, 2014.
- DOCA, R. H.; BISCUOLA, G. J.; BÔAS, N. V. Física. 3 ed. São Paulo: Editora Saraiva, 2016. vol. 1.
- FRANÇA, G. H.; LOPEZ, J. V. Experimento de baixo custo para o ensino de física óptica: o caso da Lei de Malus. Revista Brasileira de Ensino de Física, vol. 44, e20210423, 2022.
- HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. Fundamentals of Physics. 8 ed. John Wiley & Sons, 2008. v. 1.
- NOGUEIRA, G. T.; HERNANDES, J. A. Laboratório de Física IV baseado em experimentos de baixo custo: relato de uma experiência de ensino remoto devido à pandemia de COVID-19. Revista Brasileira de Ensino de Física, vol. 43, e20210242, 2021.
- OLIVEIRA, G. G.; VASCONCELOS, A. H.; SOUSA, L. C. N.; DA COSTA, J. S.; LIMA, A. P.; SILVA, A.; CHESMAN, C. Experimentos portáteis para aula sobre indução eletromagnética, geradores e motores. Revista Brasileira de Ensino de Física, vol. 44, e20210388, 2022.
- POZO, J. I.; CRESPO, M. A. G. Aprender y enseñar ciencia: del conocimiento cotidiano al conocimiento científico. Ediciones Morata, S. I., 2006.
- RAMALHO, F.; FERRARO, N. G.; SOARES, P. A. T. Os fundamentos da Física. 9 ed. São Paulo: Moderna, 2007. v 1.
- SILVA, E. S. Estudo da relação entre o movimento circular uniforme e o movimento harmônico simples utilizando a videoanálise de uma roda de bicicleta. Revista Brasileira de Ensino de Física, v.40, n.2, e2301, 2018.
- SILVA, E. S.; LIMA, A. R. Estimando o coeficiente de atrito cinético entre duas superfícies por meio da videoanálise. Revista Brasileira de Física Tecnológica Aplicada, Ponta Grossa, v. 6, n.1, p. 14-27, jun. 2019.
- SILVA, E. S.; LIMA, A. R. Estudo da vazão de uma fonte por meio da videoanálise: uma proposta utilizando recipientes na forma de prismas regulares. Caderno Brasileiro de Ensino de Física, v. 34, n. 3, p. 903-911, dez. 2017.
- SILVA, E. S.; SASSERON, L. H. BNCC: entre avanços de pesquisa e articulações necessárias, 2020.
- TRACKER: site do software Tracker. Disponível em: <http://physlets.org/tracker>. Acesso em: 04 jun. 2022.
- VUOLO, J. H. Fundamentos da Teoria de Erros, v.1. Edgard Blücher, São Paulo, 1996).

Recebido: 4 de julho de 2022.

Aprovado: 10 de outubro de 2022.

DOI:

Como citar: SILVA, E S; DE ARAUJO, A A V R, Independência da massa e modelagem newtoniana para a translação de objetos acelerados em cenários de investigação aberta, **Revista Brasileira de Física Tecnológica Aplicada**, Ponta Grossa, v. 10, n.1, p. 1-16, jan. 2023.

Contato: Erick dos Santos Silva: ssf.erick@gmail.com

Direito autoral: Este artigo está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição 4.0 Internacional.

