

Velocidade, taxa de captura de quadros e tipo de lente como limitantes experimentais para o uso de fotografias estroboscópicas digitais⁺

João Matheus Mendes¹

Graduando em Física

Instituto Federal do Paraná – Campus Telêmaco Borba

Lucas Anedino de Souza²

Rafael João Ribeiro³

Luiz Diego Marestoni⁴

Instituto Federal do Paraná – Campus Telêmaco Borba

Telêmaco Borba – PR

Resumo

O uso de imagens estroboscópicas é antigo e sua aplicabilidade no ensino de física se torna cada vez mais útil com o desenvolvimento de novos aplicativos e softwares. Imagens estroboscópicas digitais se apresentam como promissoras em diversas áreas da ciência, em especial para o ensino de cinemática, pois são baratas e simples. No entanto, estes experimentos têm suas limitações, tais como, contraste com o fundo, iluminação, taxa de frames da câmera, velocidade do corpo e distorção das imagens pelas lentes. No presente artigo demonstra-se quantitativamente e qualitativamente algumas limitações desta técnica a fim de ajudar no planejamento de experimentos.

Palavras-chave: *Imagens estroboscópicas; Limitações; Cinemática.*

⁺ Velocity, frames per second and lens as experimental limitations to the use of digital strobe photographs

^{*} *Recebido: maio de 2016.*

Aceito: julho de 2016.

¹ E-mail: joaomatheusmendes@hotmail.com

² E-mail: lucas.souza@ifpr.edu.br

³ E-mail: rafael.ribeiro@ifpr.edu.br

⁴ E-mail: luiz.marestoni@ifpr.edu.br

Abstract

The use of strobe images is old and its application in Physics teaching becomes increasingly useful with the development of new apps and softwares. Strobe digital images present as promising in many fields of science, especially for the kinematics because they are cheap and simple. However, these experiments have their limitations, such as contrast with the background, lighting, camera frame rate, mobile speed, distortion of images by lenses. The present article demonstrates quantitatively and qualitatively some limitations of this technique to help in the design of experiments.

Keywords: *Strobe images; Limitations; Kinematics.*

I. Introdução

Marcar o tempo utilizando-se relógios é a maneira mais antiga de se analisar movimentos e ainda hoje pode ser utilizada nas atividades de ensino de física, no entanto, esta técnica é muito imprecisa. Como alternativa de minimização de erros, a utilização de sensores para análise de movimentos é atualmente a forma mais aplicada. Porém, o custo dos sensores, interface, microcomputador e softwares se torna um fator limitante para muitos centros de ensino.

Como alternativa a este problema pode-se utilizar imagens estroboscópicas. Segundo Rosa *et al.* (2004), a construção destas imagens tradicionalmente consiste da observação de um movimento com o auxílio de um aparelho que o ilumina, com clarões breves e periódicos, registrando posições sucessivas com o auxílio de uma câmera fotográfica. No entanto, segundo Dias, Amorim e Barros (2009) a popularização deste procedimento nos laboratórios encontrou dificuldades técnicas e econômicas, já que requer o uso de câmaras fotográficas para filme, ou câmaras Polaroid, uma fonte de luz estroboscópica e uma sala escurecida, que a maioria das escolas não possui.

Uma solução difundida atualmente é a fotografia estroboscópica digital que necessita somente de um dispositivo que grave vídeo digital e um microcomputador comum. Muitos experimentos têm sido realizados utilizando-se smartphones (MONTEIRO; CABEZA; MARTI, 2015; CASTRO-PALACIO *et al.*, 2014; VOGT; KUHN, 2012; CHEVRIER *et al.*, 2013; STREEPEY, 2013) e análise de vídeos (SIRISATHITKUL *et al.*, 2013; WAGNER *et al.*, 2006a; MONSORIU *et al.*, 2005; CHUNG *et al.*, 2004). O uso de análise de vídeos em um contexto educacional abrange uma grande quantidade de aplicações para estudos de Cinemática (RODRÍGUEZ *et al.*, 2001), Dinâmica (WAGNER *et al.*, 2006b), Oscilações (MONSORIU *et al.*, 2005), Fluidodinâmica (SALETA; TOBIA; GIL, 2005; WAGNER *et al.*, 2003). Como exemplos, no trabalho de Wrasse *et al.* (2014) vídeos disponíveis na internet foram utilizados para estudar o ensino de colisões. Enfatizando o baixo custo Jesus e Sasaki (2015) propuseram

o estudo de atrito cinético e estático utilizando-se uma pilha. Tais trabalhos demonstram a aplicabilidade da técnica para o ensino de movimentos e enfatizam o custo baixo de realização destes experimentos frente ao uso de sensores.

Uma extensão desta técnica como uma ferramenta de rotina nos laboratórios de física é a utilização de câmeras de baixo custo (PAGE, 2008) ou smartphones. No entanto, a realização destes experimentos também apresentam limitações. No trabalho de Page (2008) são discutidos os efeitos da distorção das imagens devido às lentes que são usadas. Este é com certeza um dos fatores que devem ser corrigidos ao se realizar experimentos, mas, para casos em que o deslocamento é pequeno, em relação à distância câmera objeto, tal fator se torna irrisório e outros fatores, tais quais discutidos no artigo, se tornam mais importantes.

Outro problema das câmeras de baixo custo é o tipo de sensor utilizado para captura das imagens, atualmente, no mercado há dois tipos de sensores mais comuns: CMOS (*complementary metal-oxide semiconductor*) e CCD (*charge-coupled device*). Em celulares é comum a utilização de sensores do tipo CMOS, pois este tipo de sensor possui a vantagem de ter um baixo consumo de energia, algo relevante quando se trata de dispositivos móveis.

Na revisão de Bigas *et al.* (2006) são elencadas as vantagens do sensor CMOS como: o baixo custo de fabricação, baixo consumo de energia, a integração do chip de processamento da imagem ao sensor, miniaturização, entre outras. As desvantagens deste sensor são: baixa sensibilidade luminosa, ruídos, baixo alcance dinâmico de exposição de luz e uma imagem com qualidade inferior quando comparado com sensores do tipo CCD.

No caso de capturas de imagens de objetos em alta velocidade, os sensores CMOS possuem uma característica na sua fabricação e funcionamento que desfavorecem a captura de imagens nestes casos, pois, conforme Bigas *et al.* (2006), o sensor CMOS é baseado em fileiras de fotodiodos e captam a imagem processando essas fileiras de pixels iniciando na parte superior do sensor e sequencialmente processam linha por linha até a chegar na última fileira de fotodiodos do sensor. Este processo resulta em um efeito de imagem conhecido como *rolling shutter*, responsável pela distorção de imagens de objetos em alta velocidade. Esse efeito ocorre principalmente em câmeras CMOS de baixo custo, pois não possuem tecnologias apropriadas para redução desse efeito. Uma discussão técnica sobre as limitações e soluções para evitar esse tipo de efeito em sensores CMOS é apresentada em Stevanovic *et al.* (2000).

A iluminação que o sensor é exposto também é determinante para a qualidade das imagens. O estudo da iluminação envolveria a sua intensidade, ângulo, comprimento de onda. Tais fatores são notadamente importantes para minimizar as estrias das imagens.

Uma das maneiras de se corrigir o problemas seria, conforme citado por Dias *et al.* (2009), diminuir o tempo de acumulação pelo sensor. No entanto, as câmeras digitais mais simples e os smartphones não permitem a alteração da sensibilidade ótica quando operadas no modo de vídeo, restando apenas alterar a iluminação do ambiente.

No entanto, o objetivo do presente trabalho foi verificar as condições de uso em práticas laboratoriais de rotina, desta maneira, todas as medidas foram feitas com iluminação natural. Ou seja, o objetivo do artigo é apresentar limitações que a fotografia estroboscópica digital apresentou quando se tentou construir imagens estroboscópicas para análises qualitativas e quantitativas dos movimentos. Desta maneira, o artigo se propõe ajudar o planejamento de professores que desejem trabalhar com esta ferramenta.

II. Materiais e método

Quando se deseja produzir uma imagem estroboscópica digital a câmera para aquisição do vídeo é o equipamento mais importante do experimento. De suas características a taxa de quadros por segundo (em inglês *frames per second*, abreviado como *fps*) é definida como a unidade de medida do ritmo de um dispositivo audiovisual registrar imagens, ou seja, é o número de imagens que o dispositivo registra ou exibe por unidade de tempo.

De maneira a verificar o comportamento das imagens estroboscópicas digitais e sua análise quantitativa, foi montado um experimento utilizando-se um conjunto de trilho de ar da marca Cidepe, modelo EQ820C e três tipos diferentes de gravadores de vídeos, ambos posicionados a 1,2 m do trilho, tal que o efeito da distorção das imagens devido à posição não influenciou no trabalho de comparação dos equipamentos, variando-se entre elas o tipo de lente e a taxa de *fps*: a) câmera filmadora digital tipo handycam marca Sony modelo HDR-PJ230, ajustada para capturar vídeos em alta definição (1080px), equipada com lente angular ZEISS Vario-Tessar de 29,8 mm e com uma taxa de 60 *fps*; b) um smartphone Samsung modelo Gran Prime Duos (celular 1), com lente tipo F2.6, que captura imagens com a definição de 1080px com uma taxa de 30 *fps* e c) um smartphone Microsoft modelo Lumia 640xl (celular 2), com taxa de 24 *fps* e lente ZEISS, que captura imagens com alta definição (1080px).

A etapa da gravação da imagem do experimento, em geral, é um processo relativamente simples de ser realizado. Alguns cuidados como o posicionamento da câmera, iluminação adequada, etc., têm que ser tomados, para que a qualidade do resultado final seja satisfatória. Esta é, sem dúvida, a etapa mais simples, porém bastante importante do processo, já que é dela que irá depender grande parte dos resultados obtidos (BARBETA, 2002).

As imagens foram analisadas utilizando-se um microcomputador e dois softwares de acesso livre: Tracker⁵ e ImageJ⁶. Com o software ImageJ os vídeos foram decompostos em uma sequência de fotogramas individuais, onde cada um destes revela uma cena do movimento. Estes fotogramas são superpostos em uma única foto, obtendo-se uma fotografia digital estroboscópica do movimento, utilizadas para demonstrações qualitativas de experimentos. Com o software Tracker foram analisados os movimentos de maneira a obter o valor da aceleração de cada experimento.

⁵ Disponível em: <<http://www.cabrillo.edu/~dbrown/tracker/webstart/tracker.jnlp>>. Acesso em: 18 abr. 16.

⁶ Disponível em: <<http://rsb.info.nih.gov/ij/>>. Acesso em: 18 abr. 16.

No experimento, um cavalete foi posicionado em uma extremidade do trilho e na outra posicionada uma roldana com atrito desprezível, conforme figura 1. Foi posicionado um círculo de papel vermelho sobre o cavalete para facilitar a construção das imagens, pois proporciona contraste a fim de facilitar a definição da posição do móvel nas imagens. A posição do papel vermelho foi determinada automaticamente pelo Tracker. O experimento consistiu em ligar o cavalete a um fio que passava pela roldana e com a outra extremidade fixada em uma massa suspensa.

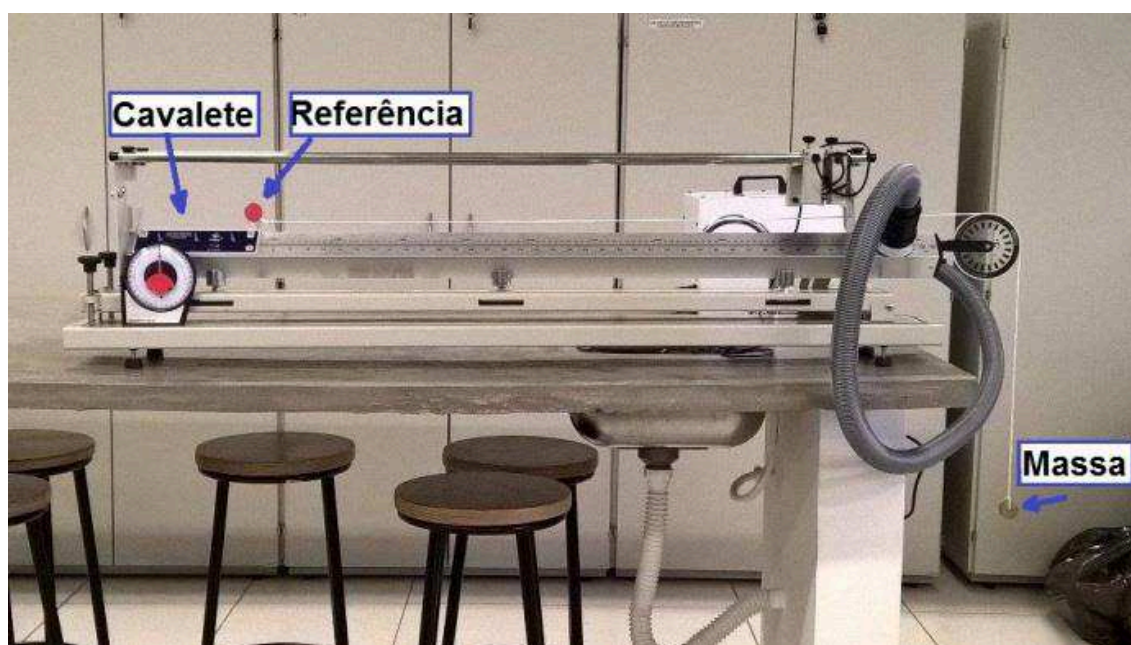


Fig. 1 – Aparato experimental do trilho de ar, com cavalete, massa suspensa e câmera filmadora.

Foram realizados experimentos em quintuplicata com as massas de 10 g, 50 g, 100 g, 200 g e 300 g com o objetivo de determinar o comportamento da construção das imagens do movimento do cavalete com diferentes velocidades. Os filmes foram gravados e transferidos para um microcomputador para análise.

III. Resultados e discussão

Utilizando-se o software ImageJ pode-se construir as imagens estroboscópicas. Tais imagens podem ser utilizadas com fins didáticos em atividades qualitativas de laboratório. As imagens representativas obtidas utilizando-se 10 g, 50 g, 100 g, 200 g e 300 g de massa com a câmera, o celular 1 e o celular 2 podem ser verificadas nas Fig. 2 a 6.

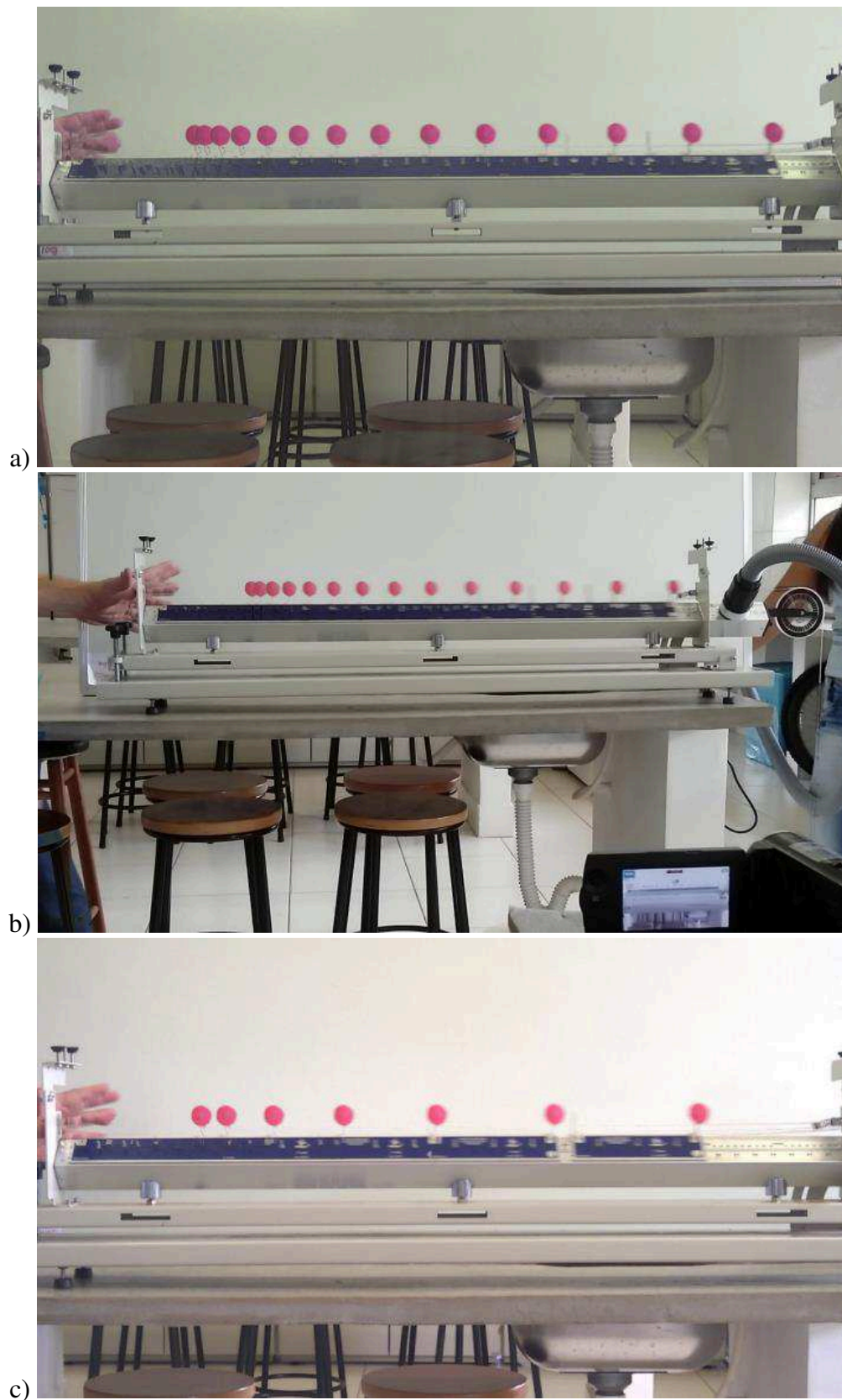


Fig. 2 – Imagens estroboscópicas para massa de 10 g utilizando-se a) câmara (figura construída com a metade da quantidade de frames disponíveis), b) celular 1 e c) celular 2.

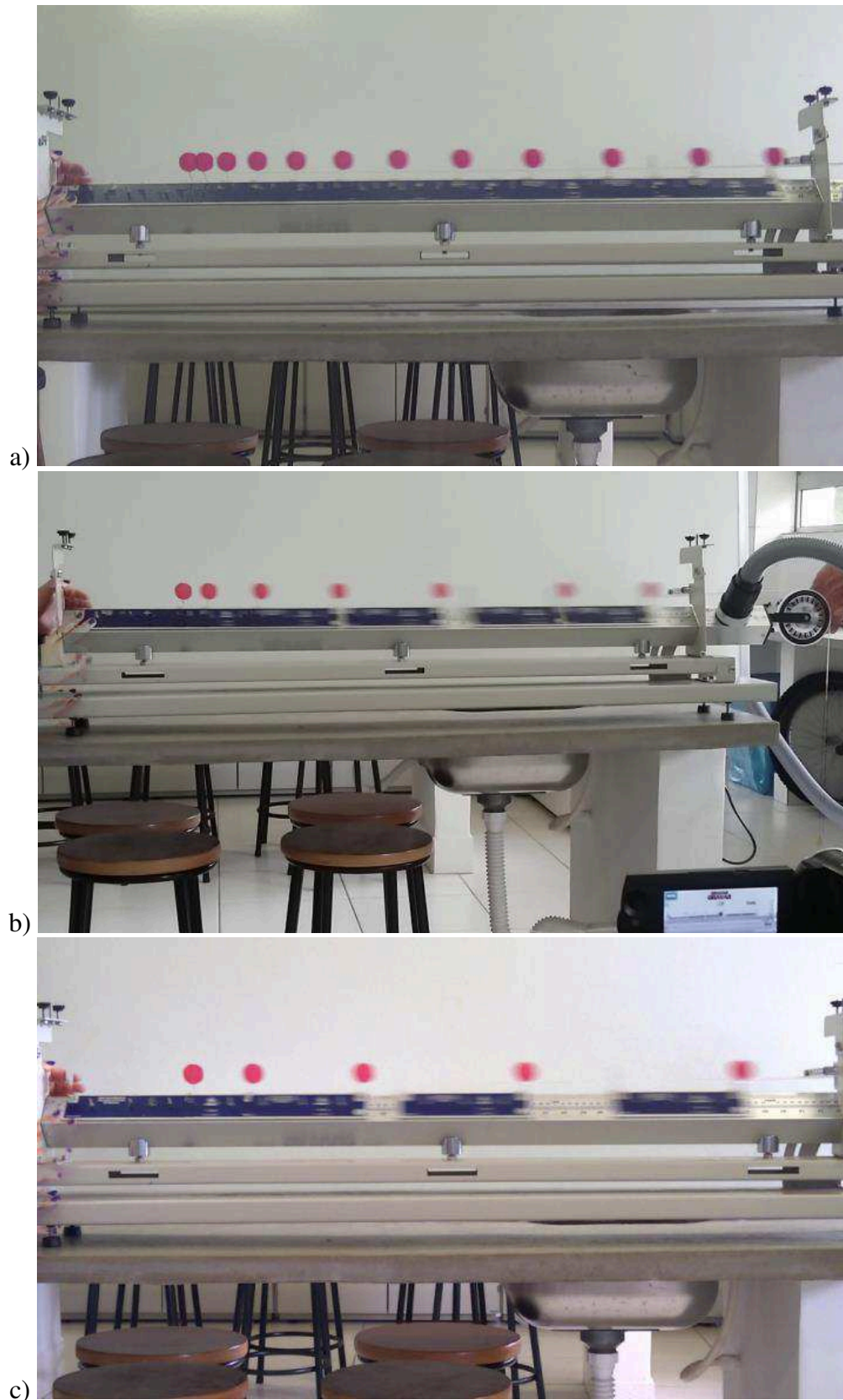


Fig. 3 – Imagens estroboscópicas para massa de 50 g utilizando-se a) câmera, b) celular 1 e c) celular 2.

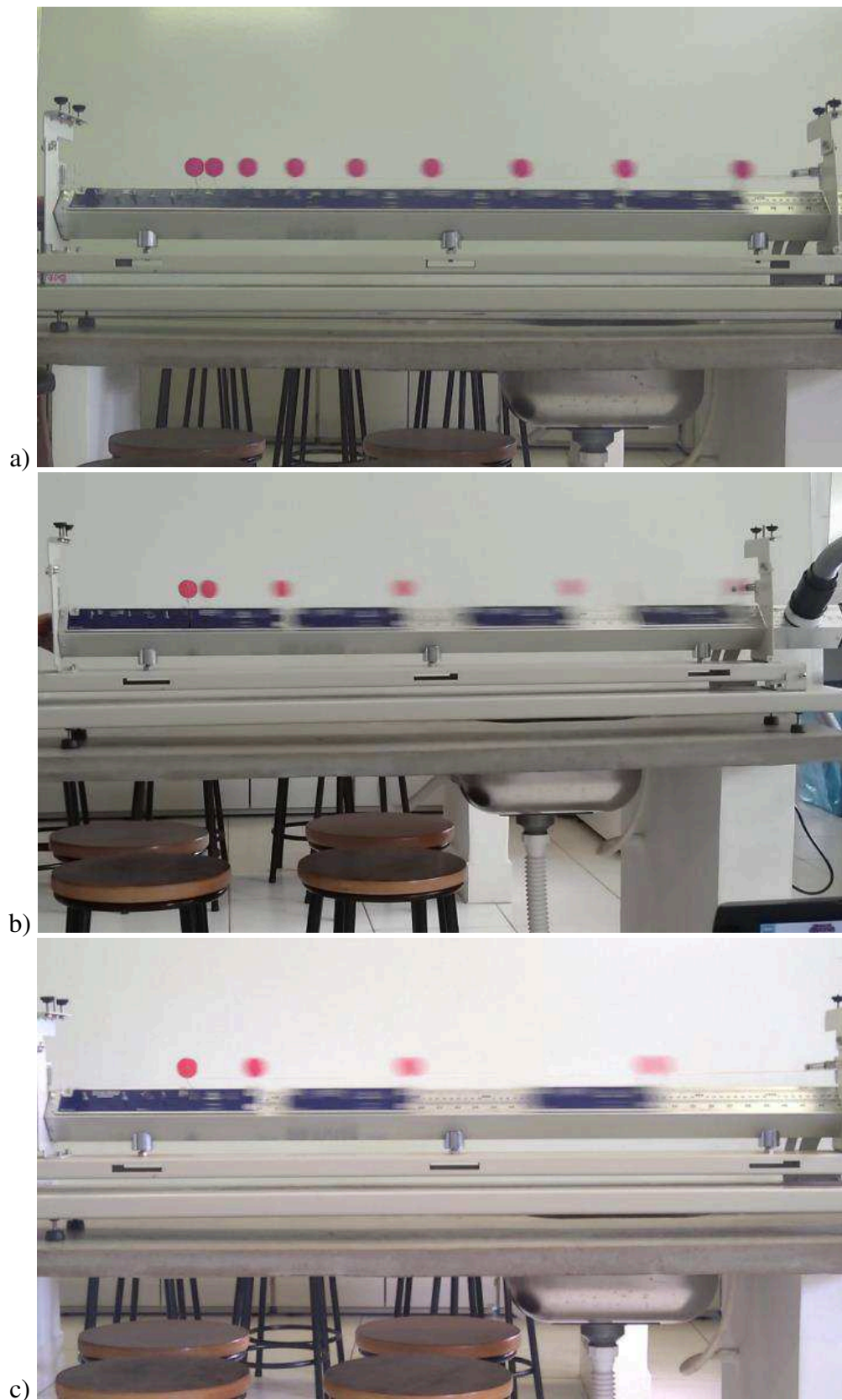


Fig. 4 – Imagens estroboscópicas para massa de 100 g utilizando-se a) câmera, b) celular 1 e c) celular 2.

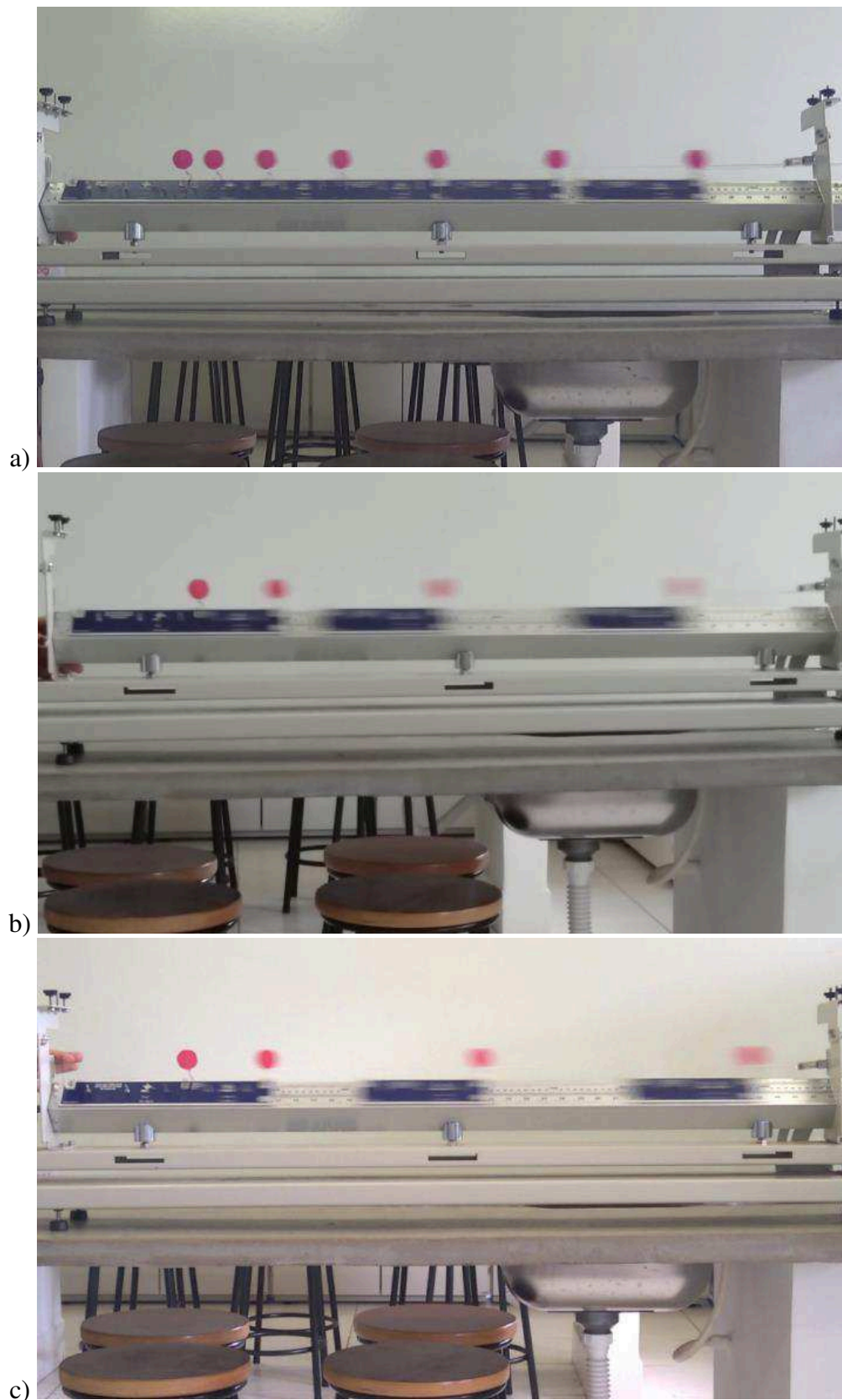


Fig. 5 – Imagens estroboscópicas para massa de 200 g utilizando-se a) câmera, b) celular 1 e c) celular 2.

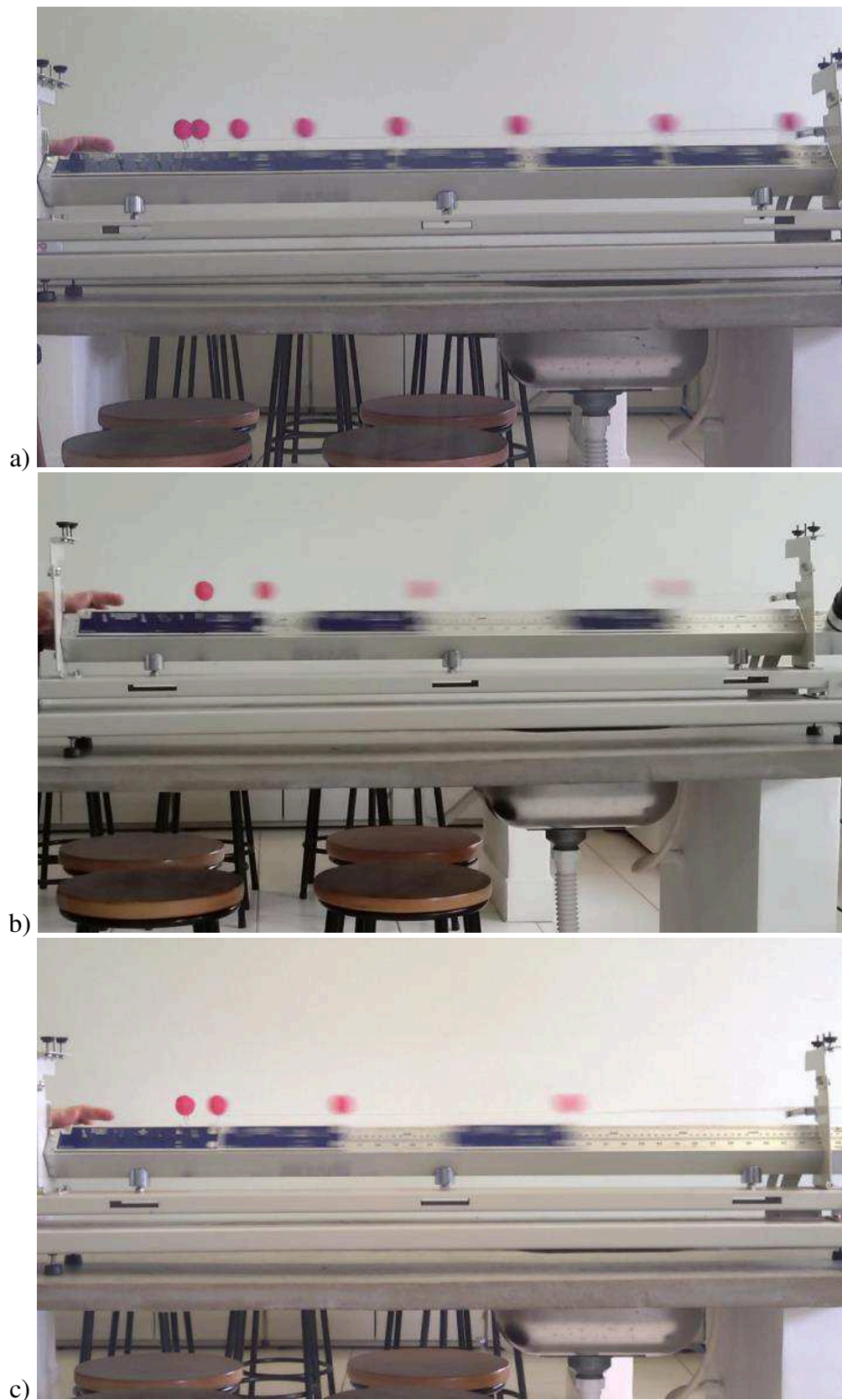


Fig. 6 – Imagens estroboscópicas para massa de 300 g utilizando-se a) câmera, b) celular 1 e c) celular 2.

Quanto às análises qualitativas, pode-se perceber que quando se utiliza uma massa menor, devido à velocidade final ser proporcional a ela, as imagens com qualquer equipamento apresentam uma boa resolução para utilização nas atividades, ou seja, o professor poderia utilizar os equipamentos dos alunos como material de apoio. No entanto, conforme a massa suspensa se torna maior, o que resulta em uma velocidade final maior, a imagem perde resolução e os equipamentos mais simples, como os celulares, apresentam imagens distorcidas. Tais fatos se devem a taxa de *fps* de cada equipamento. Desta maneira, os equipamentos acabam registrando imagens parciais dos objetos em diferentes frames quando o objeto se desloca com velocidades relativamente maiores, ou seja, borram-se as imagens. Apesar da imagem da câmera ser melhor em relação aos celulares, mesmo assim sua imagem perdeu resolução considerável com o incremento na velocidade.

Em relação ao nosso objeto de estudo, pode-se perceber que o fator limitante para o uso de filmadora digital em experimentos de cinemática está na taxa de *fps* do equipamento, no tipo de lente e na velocidade do móvel. A qualidade das imagens dos corpos foi reduzindo consideravelmente à medida que velocidade destes aumentou e melhorou à medida que a taxa de *fps* aumentou. Ainda, comparando os dois celulares pode-se perceber que o tipo de lente utilizada no celular 1 apresentou uma vantagem em relação ao celular 2. Tal fato é corroborado pelas discussões apresentadas no trabalho de Page *et al* (2008), onde os autores mostram a colaboração das distorções causadas pelas lentes de câmeras.

Por outro lado, o software Tracker é utilizado também em experimentos quantitativos para análise dos movimentos. Como parâmetro de qualidade dos equipamentos utilizados no presente trabalho determinou-se a aceleração do conjunto, comparando-se com os valores teóricos, visto que este é procedimento corriqueiro em atividades de cinemática.

As acelerações teóricas, sem atrito e resistência do ar, resultantes para cada massa podem ser obtidas utilizando-se as equações (1) e (2). Em trilhos de ar, teoricamente, não há atrito entre as superfícies, porém, conforme estudos de Qi e Wang (2007), há outros fatores que podem provocar atritos que ocasionam erros nas medidas experimentais. Um estudo teórico e experimental sobre os efeitos da resistência do ar em experimentos com trilhos de ar é discutido em Andereck (1999).

$$a = \frac{m_{sus}}{(m_{cav} + m_{sus})} \cdot g_{\lambda,z} \quad (1)$$

Onde, m_{sus} é a massa suspensa, m_{cav} é a massa do cavalete (200 g) e $g_{\lambda,z}$ é o valor da aceleração da gravidade local em função da latitude (λ) e altitude (z) para cidade de Telêmaco Borba, conforme equação (2), prevista por Lopes (2008).

$$g_{\lambda,z} = g_0(1 + \beta \sin^2 \lambda) \left(1 - \frac{2z}{R}\right) \quad (2)$$

Substituindo os dados de Santos (2015) ($\lambda = 24,37^\circ$ e $z = 760$ m) na equação (2) obtém-se o valor de $g_{\lambda,z} = 9,787$ m s⁻². Substituindo este resultado e os valores das massas na equação (1) pode-se obter o valor teórico da aceleração em cada experimento, conforme

apresentado no gráfico da figura 8, além da comparação com os valores experimentais. Tais valores foram calculados a partir do ajuste polinomial de segundo grau ajustado pelo método dos mínimos quadrados da função da posição (cm) *versus* tempo (s). As posições e tempos foram obtidos a partir da análise das imagens estroboscópicas. Com este ajuste também se obteve o desvio padrão da aceleração (σ), o que permitiu exibir os resultados com 99% de confiança (3σ). A distância entre os pontos permitiu inferir a qualidade dos equipamentos.

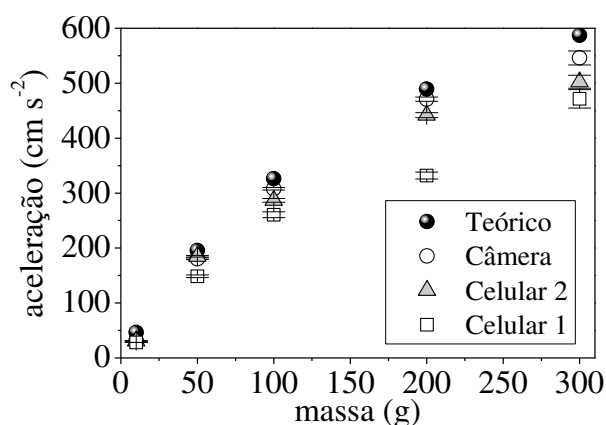


Fig. 8 – Comparação das acelerações com o resultado teórico (99% de confiança).

Verifica-se nestes experimentos que os resultados se comportaram como o esperado na montagem das imagens, ou seja, os resultados da câmera ficaram melhores, visto que os pontos com maior aceleração se aproximam mais das previsões teóricas, o que se deve a melhor qualidade das imagens. Na sequência, o celular 2 apresentou um resultado levemente superior ao celular 1 devido ao tipo de lente usada, o que está de acordo com o previsto por Page *et al.* (2008).

Pode-se notar também que em todos os casos quanto maior o valor da aceleração, o que implica em maior velocidade final, os resultados se distanciaram das previsões teóricas. Isto se deve provavelmente a baixa na qualidade da imagem e ao atrito com o ar. A distorção na imagem devido à lente não influenciou consideravelmente os resultados, visto que, caso a distorção fosse o fator predominantemente considerável todos os pontos deveriam apresentar a mesma distância das previsões teóricas.

Desta maneira, verifica-se que a realização de experimentos estroboscópicos utilizando vídeo análise é muito útil para quando se deseja trabalhar com velocidades reduzidas ($<1,5 \text{ m s}^{-1}$), nestes casos, a análise qualitativa das imagens é consideravelmente mais prejudicada que a análise quantitativa do movimento, no entanto, mesmo esta é limitada para velocidades maiores.

Com smartphones convencionais não é possível montar imagens a velocidades altas. A fim de quantificar este limite, considera-se que as imagens utilizando-se 50 g de massa suspensa já apresentam qualidade contestável e pode ser utilizada como limite de

qualidade no presente trabalho. Utilizando a equação 1, obtêm-se neste caso uma aceleração teórica de $1,96 \text{ m s}^{-2}$. Utilizando-se este resultado na equação (3), sabendo-se que o cavalete parte do repouso e que gastou $0,87 \text{ s}$ para percorrer todo o trilho, determina-se:

$$\begin{aligned}v(t) &= v_o + a \cdot t & (3) \\v(0,87) &= 1,96 \cdot 0,87 \\v(0,87) &= 1,70 \text{ m s}^{-2}\end{aligned}$$

A título de exemplo da limitação da técnica para experimentos de mecânica, tal velocidade equivale a experimentos de queda livre de $0,15 \text{ m}$ de altura e resulta em uma imagem estroboscópica nítida para análise qualitativa do movimento. Desta maneira, apesar de uma ferramenta valiosa, a utilização de celulares para análises de movimentos é recomendada somente para velocidades baixas ($< 1,7 \text{ m s}^{-1}$).

Assim, tem-se que levar em consideração as aplicações que deseja realizar. A construção de imagens estroboscópicas é muito útil para exemplificar os movimentos, no entanto, se apresenta bastante limitada em relação à velocidade com equipamentos convencionais disponíveis aos alunos. Nestes casos deverão que ser realizados experimentos com câmeras de alta taxa de *fps*, o que encarece o projeto com o aumento da velocidade desejada.

No caso da análise quantitativa os dados ajustados foram relativamente bons, o que permite trabalhar com velocidades maiores. No entanto, mesmo neste caso, utilizando-se a equação 3 para a massa de 300 g verifica-se velocidades superiores a $3,0 \text{ m s}^{-1}$, que se tornam problemas para smartphones convencionais com sensores CMOS de baixo custo, que não possuem tecnologias apropriadas para capturar objetos em alta velocidade sem resultar em problemas na qualidade da imagem, como o caso do efeito *rolling shutter*, discutido anteriormente, demais efeitos causados pelo tipo de sensor CMOS em comparação com o CCD são revisados por Litwiller (2001).

IV. Conclusão

A estroboscopia digital se apresenta como uma alternativa de baixo custo para realização de experimentos de cinemática. É uma ferramenta poderosa para análise de movimentos, visto que permite a obtenção de uma maior quantidade de pontos com um custo muito baixo, principalmente quando se utiliza smartphones convencionais já de posse dos alunos. No entanto, as limitações apresentadas no trabalho tem que ser levadas em consideração quando se deseja planejar um experimento. O conhecimento do equipamento disponível e suas características são fundamentais para o sucesso do experimento. Altas velocidades resultam em imagens que são parcialmente tomadas entre um frame e o subsequente, o que resulta em uma imagem borrada, prejudicando análises qualitativas e principalmente quantitativas. Desta maneira, o planejamento proposto no trabalho pode ser decisivo para o sucesso do experimento. Deve-se

considerar qual o equipamento utilizado, quais as velocidades empregadas e se será trabalhado qualitativamente ou quantitativamente os resultados.

Agradecimentos

Ao IFPR e CNPq pelo financiamento de bolsista no projeto PIBIC; Cristiane Marciel Soares pelos vídeos gravados e cessão do celular 1; Matheus Haas Verdi pelos vídeos gravados e cessão do celular 2; Renam Michel Pratkaná pela orientação quanto aos tipos de lentes.

Referências

ANDERECK, B. S. Measurement of air resistance on an air track. **American Journal of Physics**, v. 67, n. 6, p. 528-533, 1999.

BARBETA, V. B.; YAMAMOTO, I. Desenvolvimento e utilização de um programa de análise de imagens para o estudo de tópicos de mecânica clássica. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, São Paulo, v. 24, n. 2, p. 158-167, Jun. 2002 .

BIGAS, M.; BIGASA, M.; CABRUJAA, E.; FORESTB, J.; SALVIB, J. Review of CMOS image sensors. **Microelectronics Journal**, v. 37, n. 5, p. 433-451, 2006.

CASTRO-PALACIO, J. C.; VELAZQUEZ, L.; GOMEZ-TEJEDOR, J. A.; MANJON, F. J.; MONSORIU, J. A. Using a smartphone acceleration sensor to study uniform and uniformly accelerated circular motions. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, São Paulo, v. 36, n. 2, p. 1-5, Jun. 2014 .

CHEVRIER, J.; MADANI, L.; LEDENMAT, S.; BSIESY, A. Teaching classical mechanics using smartphones. **The Physics Teacher**, v. 51, n. 6, p. 376, Set. 2013.

CHUNG, H. C.; LIANG, J.; KUSHIYAMA, S.; SHINOZUKA, M. Digital image processing for non-linear system identification. **International Journal of Non-Linear Mechanics**. v. 39, n. 5, p. 691-707, Jul. 2004.

DIAS, M. A.; AMORIM, H. S.; BARROS, S. S. Produção de fotografias estroboscópicas sem lâmpada estroboscópica. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 26, n. 3, p. 492-513, dez. 2009.

JESUS, V. L. B.; SASAKI, D. G. G. O experimento didático do lançamento horizontal de uma esfera: Um estudo por videoanálise. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, São Paulo, v. 37, n. 1, 1507, Mar. 2015.

LITWILLER, D. CCD vs. CMOS. **Photonics Spectra**, v. 35, n. 1, p. 154-158, 2001.

LOPES, W. Variação da aceleração da gravidade com a latitude e altitude. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 25, n. 3, p. 561-568, dez. 2008.

MONSORIU, J. A.; GIMENEZ, M. H.; RIERA, J.; VIDAURRE, A. Measuring coupled oscillations using an automated video analysis technique based on image recognition. **European Journal of Physics**, v. 26, n. 6, p. 1149, Set. 2005.

MONTEIRO, M.; CABEZA, C; MARTI, A. C. Acceleration measurements using smartphone sensors: Dealing with the equivalence principle. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, São Paulo, v. 37, n. 1, 1303, mar. 2015.

PAGE, A; MORENO, R; CANDELAS, P; BELMAR, F; The accuracy of webcams in 2D motion analysis: sources of error and their control. **European Journal of Physics**, v. 29, p. 857, 2008.