



**CONGRESO
IBEROAMERICANO**
DE CIENCIA, TECNOLOGÍA,
INNOVACIÓN Y EDUCACIÓN

BUENOS AIRES, ARGENTINA
12, 13 Y 14 DE NOVIEMBRE 2014

**CONGRESSO
IBERO-AMERICANO**
DE CIÊNCIA, TECNOLOGIA,
INOVAÇÃO E EDUCAÇÃO

BUENOS AIRES, ARGENTINA
12, 13 Y 14 DE NOVIEMBRE 2014

PÊNDULO SIMPLES GIGANTE: ESTUDO QUALITATIVO E QUANTITATIVO.

GONÇALVES, B.; DIAS JÚNIOR, M.M.; KISTENMACKER, N.D.; ALMEIDA,
G.P.C.

PÊNDULO SIMPLES GIGANTE: ESTUDO QUALITATIVO E QUANTITATIVO

¹Bruno Gonçalves

Mário M. Dias Júnior

Nathalia D. Kistenmacker

Graziele P. C. Almeida

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Sudeste de Minas Gerais
IF Sudeste MG, 36080-001, Juiz de Fora - MG, Brazil

¹E-mail: bruno.goncalves@ifsudestemg.edu.br

RESUMO

O Pêndulo Simples é constituído por um corpo suspenso em um fio de massa desprezível e inextensível e quando afastado de sua posição de equilíbrio estável, oscila no plano vertical, em torno do ponto de fixação do fio, devido ao fato de a energia mecânica do sistema se conservar, alternando entre as formas de energia potencial e energia cinética. Em um experimento simples cujo objetivo é obter o valor da gravidade local, pode-se ensinar ao aluno diversos conceitos relacionados à prática laboratorial. Por essa razão, é necessário verificar se o experimento realizado em sala possui, de fato, precisão confiável. Para isso, realizou-se experimento com diversos comprimentos de corda, a fim de verificar se sua variação influencia na precisão do valor obtido para a gravidade. Para isso, estabeleceu-se parceria com o Corpo de Bombeiros Militar de Minas Gerais a fim de obter medidas com L grande e compará-las com o experimento realizado em sala de aula e realizar o tratamento estatístico necessário. É esperado, da teoria, que quanto maior seja L mais precisa seja a medida. Como a Física é uma ciência experimental, montamos um aparato para verificar essa hipótese. O desenvolvimento das atividades é descrito neste trabalho.

PALAVRAS-CHAVE: pêndulo simples, movimento harmônico, gravidade.

1 Introdução:

O Pêndulo Simples é constituído por um corpo suspenso em um fio de massa desprezível e inextensível e quando afastado de sua posição de equilíbrio estável, oscila no plano vertical, em torno do ponto de fixação do fio, devido ao fato da energia mecânica do sistema se conservar, alternando entre as formas de energia potencial e energia cinética (NUSSENVEIG, 2002).

Com o uso do pêndulo simples é possível introduzir vários conceitos de física experimental. Em um experimento simples cujo objetivo principal é obter o valor da gravidade local, pode-se ensinar ao aluno noções de estatística básica, propagação de erros de medidas, classificação de erros, movimentos oscilatórios e periódicos e vários outros conceitos relacionados à prática laboratorial (BARROSO ET AL, 1991). Neste trabalho específico, tem-se como objetivo fazer um estudo matemático e estatístico das possíveis diferenças que pode haver entre o aparato disponível em sala de aula com um pêndulo de comprimento consideravelmente maior. É esperado que com o aumento do comprimento da corda que segura o corpo, haja maior precisão no resultado do experimento. O foco principal aqui é determinar se a diferença entre o experimento realizado nas escolas e universidades com os alunos e o mesmo experimento com maior grau de complexidade e um comprimento bem maior é considerável. Estabelecemos como comprimento comum utilizado em laboratório o comprimento da corda (L) de até 1 metro e como pêndulo gigante o L de até uma ordem de grandeza acima. O experimento em si consiste em calcular o valor da gravidade local e para isso usamos comprimentos de corda (L) diferentes, massas diferentes, corpos de formatos diferentes e ambientes diferentes.

O problema técnico frequentemente encontrado para a realização do experimento em sala de aula é a dificuldade em medir o período de oscilação do pêndulo. Isso ocorre, pois sua frequência é alta, o que aumenta a dificuldade em medi-lo. Por essa razão, o indicado é fazer 10 oscilações e dividir o período total por 10. Já no pêndulo gigante a dificuldade encontrada é a montagem do mesmo, pois demanda muito espaço, segurança especializada,

equipamentos específicos, além de precisar ser realizado em local externo e demandar muito tempo. Por esse motivo, foi realizada parceria com o Corpo de Bombeiros Militar de Minas Gerais para a execução do experimento com comprimento grande. O pêndulo grande foi montado sob orientação do Prof. Dr. Bruno Gonçalves e de dois militares especialistas em escalada. Por esses motivos, o grupo objetivou sanar todas as dificuldades técnicas realizando diversas medidas, com a finalidade de obter um melhor tratamento estatístico.

Ao montar o experimento, o grupo buscou demonstrar que a gravidade obtida com L grande seria mais precisa que quando o mesmo experimento fosse realizado com L pequeno.

Nas fotos 1 e 2 pode-se observar a realização do experimento com L grande. A diferença entre as massas pode ser observada e essa mesma diferença foi mantida no experimento com L pequeno. Partimos da hipótese que o período de oscilação não depende da massa, como é previsto pela teoria (que veremos a seguir) e através

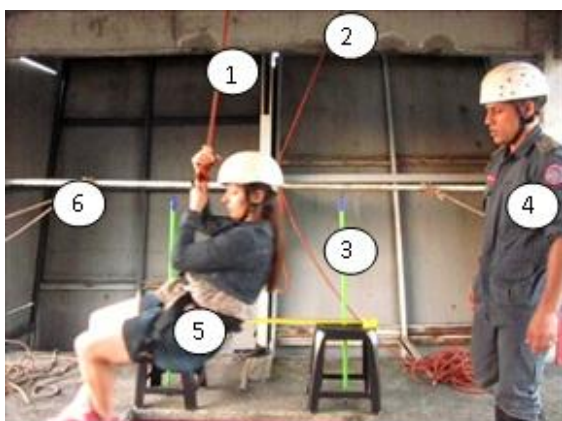


Figura 01: Pêndulo gigante com massa menor.



Figura 02: Pêndulo gigante com massa maior.

desse experimento buscou-se essa análise.

- 1 – Corda do pêndulo
- 2 – Corda de segurança
- 3 – Aparato para determinar o início das oscilações
- 4 – Bombeiro

5 – Corpo utilizado como massa do pêndulo simples

6 – Início da delimitação da área de segurança

2 Metodologia

Para a realização das medidas foram utilizados dois pêndulos, o primeiro foi denominado pêndulo pequeno, com L cerca de 1 m, o segundo foi denominado pêndulo grande, com L de uma ordem de grandeza acima.

Para o pêndulo pequeno o sistema experimental era composto de base, suporte, fio de nylon, pesos cilíndricos, cronômetro e trena. O fio de nylon foi preso ao suporte com um nó cego e os corpos utilizados para oscilação foram presos com vários nós cegos de forma que não houvesse nenhum movimento rotacional em relação ao seu centro de massa. Para a obtenção das medidas havia dois operadores, o primeiro operador fez o pêndulo oscilar, no mesmo instante um segundo operador deveria acionar o cronômetro (ARNOLD ET AL, 2011) a cada oscilação completa. É necessário ressaltar que o cronômetro utilizado era um cronômetro de volta, portanto, a cada toque dado o aparelho marcava o tempo e prosseguia sem zerar.

Já no pêndulo grande, o sistema experimental era composto por corda, bouldrier, freio oito, freio ATC, fita anel costurada, mosquetão e capacete. Nesta etapa foi verificadas dificuldades na montagem do aparato experimental, pois necessitava de ser executado em ambiente externo, com segurança especializada e equipamentos de escalada. Por este motivo, foi realizada uma parceria com o Corpo de Bombeiros Militar de Minas Gerais.

O Batalhão do Corpo de Bombeiros disponibilizou um local que possuía vários andares e no meio havia uma plataforma móvel vazada, através da qual era possível escolher qual a altura desejada pelo grupo e passar pelos vários andares do edifício. Além do espaço cedido, foi essencial a colaboração de dois militares para assegurar que o local a realizar o experimento estivesse dentro das normas de segurança. O corpo de prova utilizado nesta etapa do trabalho foram duas alunas e devido à plataforma móvel, elas ficavam no máximo 1,5m acima do chão, garantindo assim maior segurança no experimento.

Foi colocada uma corda em volta da área a realizar o experimento onde cada um prendia-se com o mosquetão e impossibilitaria que os estudantes sofressem queda, pois estariam presos à corda. O primeiro bombeiro passou a corda pelo gancho que estava preso ao teto e foi preso o primeiro corpo à corda. Esperou-se a corda (dinâmica) estender ao máximo para então medir qual o comprimento (L) da mesma. Feito isso foi possível estimar o ângulo de abertura por trigonometria, pois havia as medidas do L (cateto adjacente) e da distância da posição de equilíbrio (OLIVEIRA, 2006) ao centro de massa de corpo (cateto oposto).

A distância entre a posição de equilíbrio e o centro de massa do corpo pode ser melhor observada ao colocar uma trena presa entre dois bancos. Foi coincidente a posição de equilíbrio com o zero da trena, isso possibilitou a medição com menor erro possível. Além disso, o grupo registrou todo o experimento com uma filmadora digital posicionada bem à frente. Após isso, iniciou-se o experimento com massas proporcionais às utilizadas no pêndulo pequeno e com os mesmos operadores no cronômetro. O mesmo teve início no meio da tarde e a visibilidade estava boa, no entanto ao entardecer foi necessário contar com a colaboração de um caminhão com refletores de luz para iluminar o local que estava sendo utilizado para que todos pudessem enxergar perfeitamente.

Com os dados obtidos nas três categorias de pêndulo (pequeno, intermediário e gigante), os valores da aceleração da gravidade e seu erro correspondente foram calculados pela equação do movimento, propagação de erros e método dos mínimos quadrados.

3 Fundamentação Teórica

Supondo que o pêndulo oscile no mesmo plano, em uma corda inextensível e de massa desprezível (conforme figura 1), podemos aplicar a segunda lei de Newton (BARBOSA, MORAES, 2010):

$$\vec{P} + \vec{T} + \vec{F}_{at} = m\vec{a},$$

(1)

onde \vec{P} é o peso da esfera, T é a tração exercida no fio, F_{at} é a força de atrito do ar.

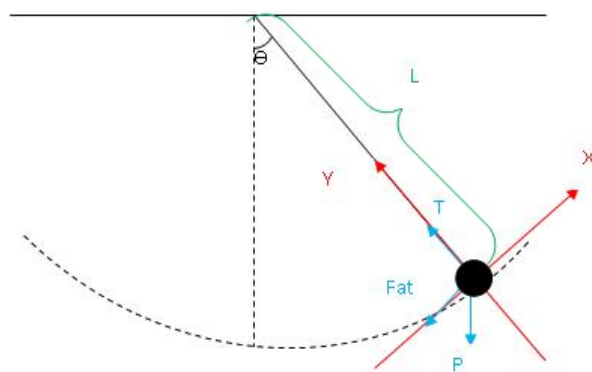


Figura 03: Esquema de um pêndulo simples e as forças atuantes consideradas.

Tomando o sistema de coordenadas da figura 3, temos no eixo y

$$-mg \cos \theta + T = ma(y)$$

(2)

onde $a(y)$ corresponde à componente da aceleração no eixo y e θ é o deslocamento angular em relação à posição de equilíbrio.

Para o pêndulo pequeno usamos fio de nylon que tem K desprezível, o mesmo foi obtido após pendurar massas previamente aferidas em escala conveniente e medindo as elongações correspondentes com trena ($\pm 0,05\text{cm}$).

Para o pêndulo grande, apesar de termos usado uma corda dinâmica, de escalada, esperou-se a corda chegar ao máximo de sua elongação e após isso iniciamos o experimento e foi verificado por observação dos participantes e posteriormente por revisão da filmagem feita, que a corda não se alongava. Com isso, podemos inferir que seu K também é desprezível, logo temos que: $a(y)$ é tão pequeno que não influenciaria nos resultados físicos, tomamos então $a(y) = 0$. Com isso obtemos em y:

$$\mathbf{T} = \mathbf{mg} \cos \theta \quad (3)$$

e em x :

$$- \mathbf{mg} \sin \theta - \mathbf{F}_{at} = \mathbf{ma}(x) \quad (4)$$

onde $a(x)$ corresponde à componente da aceleração no eixo x .

Supondo ainda que a força de arraste tem a forma analítica mais simples possível (ALONSO, FINN, 1999) e levando em conta que ela depende apenas da forma do objeto do corpo e de sua velocidade, temos que:

$$\mathbf{F}_{at} = \rho \mathbf{v} \quad (5)$$

onde ρ corresponde ao coeficiente de arraste.

A Figura 04 mostra a montagem do pêndulo antropológico. O ponto A corresponde a localização do Bombeiro 1, responsável pela segurança do corpo pendurado no ponto C. Este corpo ficava sobre uma plataforma de segurança, de forma que sua distância máxima entre ele e o chão era de até 1,5 metros, oscilava entre os pontos B e D, e o ponto laranja foi o local em que a corda era presa e este ponto pode ser considerado como fixo, visto que o Bombeiro localizado no ponto A realizava uma força no sentido de seu corpo. Vale ressaltar que a área foi cercada com corda por outro Bombeiro responsável pela segurança de todos os participantes do experimento, pois o mesmo foi realizado em um prédio com área central vazada, e à medida que se desejava aumentar o comprimento do pêndulo, bastava que o Bombeiro 1 soltasse um pouco mais de corda e efetuasse nova medição.

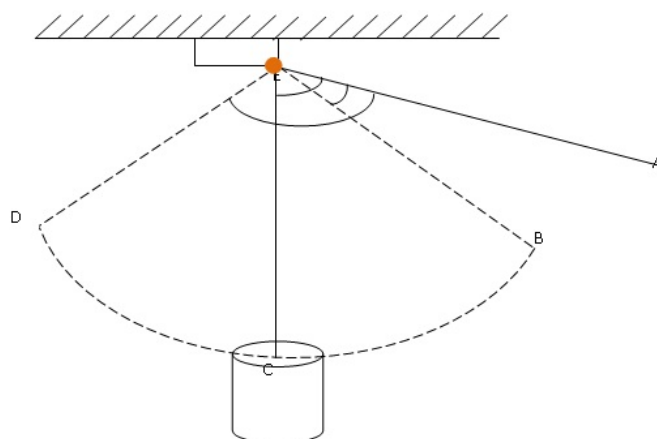


Figura 04: Esquema de montagem do pêndulo grande.

Supondo que o ponto de apoio é fixo (pois no pêndulo pequeno demos um nó cego preso num parafuso, e no pêndulo grande foi feito o nó em 8 no ponto C da figura 4 - o mais seguro, pois quanto maior a pressão exercida sobre ele mais fixo o pêndulo fica), ou seja, não há movimento de translação do sistema, a velocidade pode ser escrita da seguinte forma

$$v = l \left(\frac{d\theta}{dt} \right). \quad (6)$$

Substituindo a equação (6) na equação (5) e seu resultado na equação (3), levando em conta que $a(y) = 0$ (veja texto acima da equação (2)), temos que $a(x) = a$, então

$$- mg \sin \theta - \rho l \left(\frac{d\theta}{dt} \right) = ma. \quad (7)$$

Como a velocidade tem apenas a componente angular, a mesma propriedade se aplica para a aceleração, visto que por definição esta é a derivada da velocidade. Então, a equação (7) pode ser reescrita da seguinte forma

$$ml \left(\frac{d^2\theta}{dt^2} \right) + \rho l \left(\frac{d\theta}{dt} \right) + mg \sin \theta = 0. \quad (8)$$

Na realização do experimento, utilizou-se $\theta \leq 10^\circ$ (CARVALHAES, SUPPES, 2009), isso gerou grande dificuldade ao realizar o experimento no pêndulo grande, pois não havia possibilidade de usar um transferidor. Por isso foi necessário utilizar uma trena fixa atrás do centro de massa do corpo pendurado na corda. Como o L e a distância do local da posição de equilíbrio ao ponto em que se encontrava era conhecido, por trigonometria foi possível obter o ângulo. No pêndulo pequeno não houve esse problema, pois foi utilizado o transferidor. Nesse caso, podemos escrever:

$$\text{Sen } \theta \approx \theta \text{ (LEITHOLD, 1994)}$$

Logo (8) toma a seguinte forma:

$$(9) \quad \left(\frac{d^2\theta}{dt^2} \right) + \gamma \left(\frac{d\theta}{dt} \right) + \omega_0^2 \theta = 0$$

$$\text{onde } \gamma = (\rho/m) \text{ e } \omega_0^2 = (g/l) .$$

Supondo que a solução de (9) tem a forma

$$\theta = A e^{i\lambda t} , \quad (10)$$

onde A é a amplitude do movimento.

Depois de realizar alguns cálculos de álgebra, chegamos a solução da EDO (9) (LEITHOLD, 1994)

$$\theta(t) = A' e^{-\gamma t} \cos(\omega t + \varphi) \quad (11)$$

onde φ é a fase inicial.

A forma final fica:

$$\theta(t) = A \cos(\omega t + \varphi) , \quad (12)$$

$$\text{onde } A = A' e^{-\gamma t} .$$

A resistência do ar (ρ) não influencia o resultado do pêndulo pequeno, pois a duração do experimento é curta e por esse motivo ela pode ser englobada no erro estatístico. No pêndulo grande, apesar de ser uma situação adversa (vento e altura consideráveis), víamos pela régua (durante o experimento e na filmagem) que a amplitude não diminuía, comparando com a precisão do instrumento que utilizamos para medir.

Nesse caso, a equação (11) torna-se a equação de MHS. Matematicamente, significa que o coeficiente de arraste é desprezível, o que torna $\omega = \omega_0$ e $A = A'$. Logo, a equação (12) toma a forma

$$\theta(t) = A \cos(\omega_0 t + \varphi) \text{ , (YOUNG, FREEDMAN, 1994)}$$

$$\omega_0^2 = \left(\frac{g}{l} \right) \tag{12.1}$$

$$\omega_0 = \left(\frac{2\pi}{T} \right) \text{ (HALLIDAY, 2008)} \tag{12.2}$$

Substituindo (12.1) em (12.2) chegamos ao resultado final

$$T = 2\pi \sqrt{l/g} \tag{13}$$

4 Resultados

Foi utilizado um método matemático para análise dos dados obtidos através dos experimentos realizados, e os resultados são apresentados nesta seção.

1. Propagação de Erros

O segundo método utilizado para encontrar a aceleração da gravidade g foi o de propagação de erros, e a partir destes cálculos foi possível verificar a confiabilidade dos dados.

Da equação (13), temos:

$$g = 4\pi^2 l / T^2$$

(15.1)

Sendo $l_i = l_{iobtido} \pm \Delta l_i$, onde Δl_i é o erro sistemático proveniente do aparato de medida (0,005 m para as medidas grandes e 0,0005 m para intermediário e pequeno).

$$\bar{T}_{iobtido} = \sum_{j=1}^{10} \left(\frac{T_j \text{ cronômetro}}{10} \right) \text{ é o tempo médio.}$$

$$T_i = T_{iobtido} \pm \Delta T_i$$

$$\Delta T_i = \frac{1,1(\text{erro do operador})}{10} + \frac{(\text{erro do cronômetro})}{10} + \sqrt{\sum_{j=1}^n \frac{(\bar{T} - T_{j\text{obtido}})^2}{n-1}}$$

$$T_i = \bar{T}_{iobtido} \pm \Delta T_i + \sqrt{\frac{(\bar{T}_{\text{méd}} - \bar{T}_{iobtido})}{10}}$$

Como o cronômetro utilizado foi do modelo de volta, para realizar 10 medidas foram feitos 11 cliques.

Foi calculado g_i para cada par l_i/T_i para uma massa.

$$g_i = 4\pi^2 \frac{(l_{oi} \pm \Delta l_i)}{(T_o \pm \Delta T_i)^2} \quad (15.2)$$

Foi realizado o cálculo direto da gravidade levando em conta todas as formas de erros aleatórios envolvidos no experimento, conforme expressão abaixo:

$$g_i = \frac{4\pi^2 l_{oi}}{T_{oi}^2} \pm 4\pi^2 \left(\frac{2T_o \Delta T_i l_{oi} + T_{oi}^2 \Delta l_i}{T_{oi}^4} \right)$$

(15.3)

Tabela 1 Esquema de montagem para pêndulos grande, intermediário e pequeno.

GRANDE				INTERMEDIÁRIO		PEQUENO	
Comprimento (m)	Valor da Gravidade ($g_i \pm \Delta g_i$) (m/s ²)	Comprimento (m)	Valor da Gravidade ($g_i \pm \Delta g_i$) (m/s ²)	Comprimento (m)	Valor da Gravidade ($g_i \pm \Delta g_i$) (m/s ²)	Comprimento (m)	Valor da Gravidade ($g_i \pm \Delta g_i$) (m/s ²)
6,960	9,504±0,290	4,150	9,139±0,251	1,080	9,770±0,310	0,765	10,021±0,488
6,830	9,581±0,373	3,500	9,974±0,371	1,075	10,684±0,508	0,755	10,134±0,868
5,800	9,787±0,141	3,500	9,676±0,218	1,000	9,899±0,373	0,650	10,062±0,304
5,800	9,901±0,344	3,000	9,853±0,245	0,950	9,518±0,442	0,635	9,941±0,533
5,300	9,910±0,279	3,000	9,797±0,197	0,900	9,863±0,320	0,500	9,506±0,445
5,300	9,850±0,137	2,500	9,884±0,506	0,895	10,007±0,276	0,490	10,536±0,395
4,800	9,855±0,179	2,500	9,797±0,226	-	-	-	-
4,800	9,704±0,209	2,000	9,915±0,357	-	-	-	-
4,500	9,868±0,242	2,000	9,694±0,232	-	-	-	-
4,500	9,859±0,217	1,470	7,833±0,263	-	-	-	-
4,150	9,540±0,364	1,320	7,294±0,189	-	-	-	-

Na tabela acima (Tabela 1), temos os valores de g obtidos para o pêndulo gigante, intermediário e pequeno. É possível notar o aumento do erro das medidas realizadas à medida que o comprimento do pêndulo diminui.

Após a obtenção dos valores da aceleração da gravidade com seus devidos erros, calculou-se o erro percentual e foi possível a construção de uma nova tabela (Tabela 2). O erro percentual foi calculado com a seguinte expressão

$$\Delta g_i(\%) = \left(\frac{\Delta g_i}{g_i} \right) \times 100 \quad (16)$$

Sendo $g_L = 9,80665 \text{ m/s}^2$ (YOUNG, FREEDMAN, 1994), valor da aceleração da gravidade encontrado na literatura.

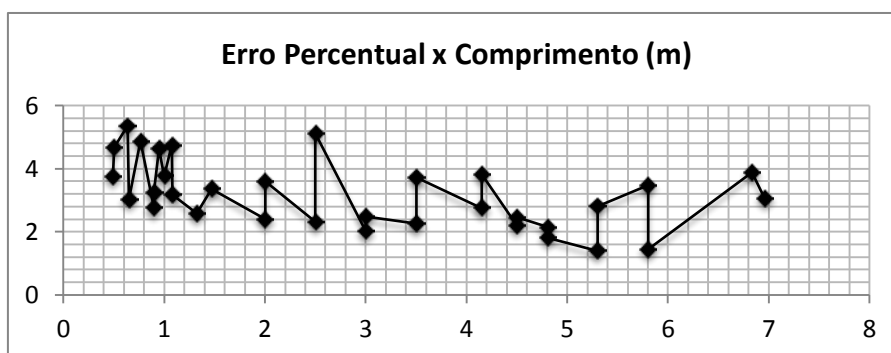
Com o cálculo do erro percentual relativo às medidas obtidas, foi possível a construção de um gráfico (Gráfico 1). Nele, pode-se observar o aumento da precisão obtida através do decaimento do erro percentual em relação ao aumento do comprimento do pêndulo.

Tabela 2 Valor experimental da aceleração da gravidade e erro percentual.

GRANDE				INTERMEDIÁRIO		PEQUENO	
Valor da Gravidade ($g_i \pm \Delta g_i$) (m/s ²)	Erro Percentual Δg_i (%)	Valor da Gravidade ($g_i \pm \Delta g_i$) (m/s ²)	Erro Percentual Δg_i (%)	Valor da Gravidade ($g_i \pm \Delta g_i$) (m/s ²)	Erro Percentual Δg_i (%)	Valor da Gravidade ($g_i \pm \Delta g_i$) (m/s ²)	Erro Percentual Δg_i (%)
9,504±0,290	3,051	9,139±0,251	2,747	9,770±0,310	3,173	10,021±0,488	4,870
9,581±0,373	3,893	9,974±0,371	3,721	10,684±0,508	4,755	10,134±0,868	8,565
9,787±0,141	1,441	9,676±0,218	2,253	9,899±0,373	3,768	10,062±0,304	3,021
9,901±0,344	3,474	9,853±0,245	2,487	9,518±0,442	4,644	9,941±0,533	5,362
9,910±0,279	2,815	9,797±0,197	2,017	9,863±0,320	3,245	9,506±0,445	4,681
9,850±0,137	1,391	9,884±0,506	5,119	10,007±0,276	2,758	10,536±0,395	3,749
9,855±0,179	1,816	9,797±0,226	2,314	-	-	-	-
9,704±0,209	2,154	9,915±0,357	3,601	-	-	-	-
9,868±0,242	2,452	9,694±0,232	2,393	-	-	-	-
9,859±0,217	2,201	7,833±0,263	3,358	-	-	-	-
9,540±0,364	3,816	7,294±0,189	2,591	-	-	-	-

Há duas maneiras principais para interpretar os dados apresentados na tabela acima (Tabela 2). A abordagem mais natural é traçar um gráfico que mostra a relação entre o aumento do comprimento e o comportamento da percentagem de erro. Como é mostrado no Gráfico 1. Mas há outra maneira de definir o erro das três experiências que foram feitas. Podemos calcular a média de todos os valores para os erros percentuais para o pêndulo gigante obtemos 4,51; para o intermediário 3,02 e para o pequeno 2,64. Isto é uma indicação de que quanto maior o comprimento quanto menor o erro.

Gráfico 1. Gráfico de Erros Percentuais.



No entanto, se olharmos o Gráfico 1 e apenas analisar as possíveis diferenças dos erros das classes de pêndulos, não é possível ver qualquer resultado quantitativo que apoiaria esta hipótese. O que podemos ver é que o pêndulo gigante oferece, para cada ponto medido, nenhuma vantagem adicional em relação ao pequeno. Para ver a diferença real é necessário realizar a classificação dos pontos, conforme explicado no último parágrafo.

5 Conclusão

O experimento foi considerado satisfatório já que os objetivos propostos pelo grupo foram alcançados. Podemos observar que à medida que o comprimento do pêndulo aumenta a precisão da medida da aceleração da gravidade também é aumentada. Torna-se necessário um cuidado especial na obtenção das medidas do comprimento, pois foi notória a diferença obtida na precisão entre os valores medidos pelos alunos e os medidos pelos bombeiros.

Através do experimento, também pode ser comprovado que o coeficiente de arraste pode ser desprezado no pêndulo pequeno ao repetir diversas vezes a experiência. O mesmo pode ser feito no pêndulo grande, se o experimento for feito com duração longa se comparado com a quantidade que a amplitude pode diminuir em cada oscilação quando se leva em conta que a precisão do instrumento para medir distâncias nesse caso não pode ser muito alta de tal forma que inviabilize a leitura de uma distância considerável do instrumento. Vale ressaltar que a câmera ficava a aproximadamente 3 m da trena, que também era a distância aproximada do observador que acionava o cronômetro.

6 Agradecimentos

Agradecemos ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Sudeste de Minas Gerais – Campus Juiz de Fora pelo apoio. Ao CNPq e ao FNDE pelo auxílio financeiro. Ao Corpo de Bombeiros Militar de Minas Gerais, especialmente o Tenente Diogo Braga Chelini como bem o Segundo Sargento Mahaveer Days Ferreira, por sua assistência com a execução do experimento

gigante. Agradecemos também o Comandante Tenente Coronel Anderson Luiz Esteves Gomes, que dispensou os militares para este procedimento.

7 Bibliografia

- 1 ALONSO, M.; FINN, E. J. **Física**. São Paulo: Addison Wesley, 1999.
- 2 ARNOLD, F. J. et al. Estudo do amortecimento do pêndulo simples: uma proposta para aplicação em laboratório de ensino. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, São Paulo, v. 33, nº4, 4311-1 - 4311-2, dez. 2011.
- 3 BARBOSA, V. C.; MORAES, P. C. G. Uma descrição newtoniana do movimento de um pêndulo esférico. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, São Paulo, v. 32, nº3, 3307- 1 - 3307- 12, fev. 2010.
- 4 BARROSO, R. C. R. S. et al. Métodos Numéricos no Ensino da Física Experimental. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, Florianópolis, v. 8, nº2, 125 – 136. 1991.
- 5 CARVALHAES, C. G.; SUPPES, P. O cálculo de alta precisão do período do pêndulo simples. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, São Paulo, v. 31, nº2, 2701-1 - 2701-6, jun. 2009.
- 6 HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. **Fundamentos de Física 1**. Rio de Janeiro: LTC, 2008.
- 7 HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. **Fundamentos de Física 2**. Rio de Janeiro: LTC, 2008.
- 8 LEITHOLD, L. **O cálculo com Geometria Analítica**. São Paulo: Harbra, São Paulo, 1994.
- 9 NUSSENZVEIG, H. M. **Curso de Física Básica 1**. São Paulo: Edgard Blücher LTDA, 2002.
- 10 NUSSENZVEIG, H. M. **Curso de Física Básica 2**. São Paulo: Edgard Blücher LTDA, 2002.
- 11 OLIVEIRA, E. L. **Análise da dinâmica de um pêndulo elástico com excitação vertical no suporte**. São José do Rio Preto: UNESP, 2006. 214 p. Dissertação (Mestrado) – Pós graduação em Matemática Aplicada, Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, São José do Rio Preto, 2006.

- 12 VILLANI, A.; CARVALHO, L. O. Dificuldades de um Estudante na Análise de Experimentos Qualitativos. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, São Paulo, v. 16, n°s, 1 - 4, mai. 1994.
- 13 YOUNG, H. D.; FREEDMAN, R. A. **Física 2**. Rio de Janeiro: LTC, 1994.