



Marcio Martins Jacob  
10801127

Gustavo de Lima Ribeiro  
11223980

Laboratório de Mecânica - Relatório sobre o experimento do pêndulo  
Nemitala Added

7,7

# Relatório sobre o experimento do pêndulo

Marcio Martins Jacob  
Gustavo de Lima Ribeiro

## Conteúdo

<b>1</b>	<b>Resumo do relatório</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Introdução ao experimento</b>	<b>3</b>
<b>3</b>	<b>Descrição experimental</b>	<b>6</b>
3.1	Arranjo experimental . . . . .	6
3.2	Procedimento experimental . . . . .	6
<b>4</b>	<b>Resultados de medições, cálculos e análise de dados</b>	<b>10</b>
<b>5</b>	<b>Discussão final e conclusões</b>	<b>16</b>
<b>6</b>	<b>Referências bibliográficas</b>	<b>17</b>

melhor separar  
discussão de  
conclusão

melhor separar  
medidas de análise

# 1 Resumo do relatório

objetivos

Um limão é pendurado ~~no teto~~ por uma corda, ao variar o comprimento da corda e o ângulo de soltura do corpo, que atua como pêndulo, e com a utilização de uma trena, de um transferidor e de um cronômetro, são tiradas as medidas necessárias para encontrar a interdependência entre os valores do comprimento da corda, do ângulo de soltura e do período de oscilação. Com os dados devidamente coletados, e as incertezas propagadas, foi estimado o valor da aceleração gravitacional local (cujo valor obtido está compatível ao nível de  $3\sigma$ ). E, também, foi encontrada a influência da aproximação realizada, ao obter a fórmula do período do pêndulo em função de seu comprimento, dentro do conjunto de dados analisados.

## 2 Introdução ao experimento

O experimento consiste em um pêndulo, cujos comprimentos de corda e ângulos em relação à vertical são variados. Por meio de conceitos da dinâmica e de osciladores harmônicos simples, pode-se analisar, qualitativa e quantitativamente, a situação física descrita. Há uma fórmula conhecida que relaciona o período de um pêndulo ( $t$ ) ao seu comprimento ( $L$ ):

$$t = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}} \quad (1)$$

Na figura 2 é mostrado o diagrama do corpo livre da massa pendurada pelo fio, na qual pode-se notar duas forças: a força-peso ( $\vec{P}$ ) causada pela interação gravitacional entre a massa do corpo e a massa da Terra e a força de tração ( $\vec{T}$ ) realizada pelo fio ao sustentar o corpo.

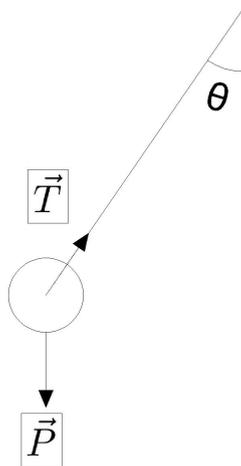


Figura 1: Diagrama do corpo livre do pêndulo

O Princípio fundamental da dinâmica, ou segunda lei de Newton, estabelece que a força resultante que atua sobre um corpo é igual ao produto da massa pela aceleração por ele adquirida. Sendo a força resultante igual à soma de todas as forças atuando sobre o corpo. Com isso, pode-se encontrar a força resultante sobre a massa pendurada somando-se, vetorialmente, a força-peso com a força de tração. Porém, pode-se decompor a força-peso em dois sentidos: paralelo à força de tração e perpendicular à força de tração, como é notável na figura 2

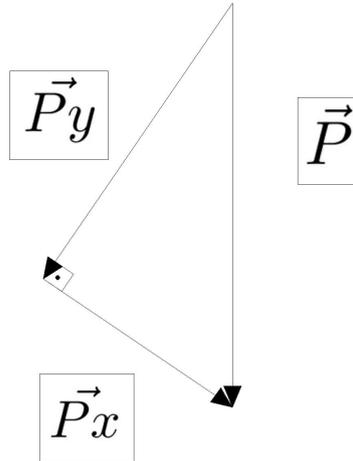


Figura 2: Decomposição vetorial

Assim, pode-se dividir a força resultante para as diferentes direções, a vertical e a horizontal, na vertical tem-se:

$$\vec{R}_y = \vec{T} + \vec{P}_y$$

E na horizontal:

$$\vec{R}_x = \vec{P}_x$$

Sendo que:

$$\vec{R} = \vec{R}_x + \vec{R}_y$$

Porém, a aceleração horizontal resultante é nula, portanto,  $\vec{R}_y = 0$  que implica em  $\vec{R} = \vec{R}_x = \vec{P}_x$ , que como é notável na figura 2:

$$\|\vec{P}_x\| = \|\vec{P}\| \cdot \text{sen}\theta$$

Para um dado deslocamento horizontal ( $x$ ), o ângulo em relação à vertical ( $\theta$ ) varia e há como relacioná-los ao comprimento da corda ( $L$ ):

$$\text{sen}\theta = \frac{x}{L}$$

E para valores de  $\theta$  pequenos:

$$\text{sen}\theta \approx \theta \quad (2)$$

Assim:

$$\|\vec{R}\| = \|\vec{P}\| \cdot \frac{x}{L}$$

O valor, em módulo da força-peso é igual ao produto da massa do corpo ( $m$ ) pela gravidade local ( $g$ ):

$$\|\vec{P}\| = m \cdot g$$

Como a massa, a aceleração gravitacional e o comprimento da corda, são constantes durante a oscilação analisada, é possível transformá-las em uma só constante:

$$k = \frac{m \cdot g}{L}$$

$$\therefore \|\vec{R}\| = k \cdot x$$

A equação acima é a mesma que a encontrada na Lei de Hooke, sendo  $\vec{R}$  a força restauradora da massa do pêndulo, com fórmula igual à força elástica, restauradora para as molas. O pêndulo, para as pequenas oscilações que estão sendo analisadas, realiza movimento harmônico simples (MHS), e para qualquer MHS, o período de oscilação é dado por:

$$t = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$$

E, ao substituir o valor de  $k$  encontrado:

$$t = 2\pi\sqrt{\frac{m}{\frac{m \cdot g}{L}}}$$

$$\therefore t = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}}$$

Como apresentado acima, na dedução da conhecida fórmula de pêndulo, é facilmente perceptível que a fórmula depende de uma aproximação para ângulos pequenos. O objetivo principal desse relatório é comparar os dados obtidos experimentalmente com os dados obtidos por meio da fórmula do período em função do comprimento do fio. Bem como, conferir o desvio esperado (da fórmula) para valores crescentes de ângulo em relação ao desvio experimental obtido. A fim de melhorar a análise, o método dos mínimos quadrados (MMQ) foi utilizado a fim de estimar as incertezas, e será mostrado, de acordo com cada caso, no capítulo 3.

### 3 Descrição experimental

A análise do experimento foi separada em dois casos distintos:

- Caso A: Variação do período devido à variação do comprimento, onde foi medido, 6 vezes para cada comprimento do barbante, o tempo de 16 oscilações, a partir do ângulo inicial de  $10^\circ$ .
- Caso B: Variação do período devido à variação do ângulo inicial, onde foi medido, 6 vezes para cada ângulo, o tempo de 10 oscilações, com o barbante ajustado no tamanho de 50cm.

#### 3.1 Arranjo experimental

Os equipamentos utilizados no experimento:

- Uma régua, ou trena, para medir os diferentes comprimentos utilizados no barbante, cuja incerteza instrumental é de  $\pm 0,05\text{cm}$ .
- Um barbante que está preso no topo e segura um limão embaixo. Seu tamanho foi medido pela régua ou trena. ??
- Um limão que foi preso ao barbante para montar o pêndulo, o tamanho de seu raio foi estimado em  $(2,5 \pm 0,5)\text{cm}$ . Como se trata de uma estimativa da distância da periferia ao centro de massa do limão (que provavelmente não tem uma distribuição de massa homogênea), a incerteza foi considerada como  $0,5\text{cm}$ . do que?
- Uma câmera para filmar o movimento pendular para os casos supracitados.
- ~~Um transferidor~~ para medir o ângulo de soltura em relação à vertical, onde a incerteza instrumental foi estimada em  $1^\circ$ . Para o Caso B, os diferentes ângulos iniciais são:

- $(10 \pm 1)^\circ$
- $(15 \pm 1)^\circ$
- $(20 \pm 1)^\circ$
- $(30 \pm 1)^\circ$
- $(45 \pm 1)^\circ$

5 graus?  
E caso A?

cuidados?

- Um cronômetro digital que, a partir da visualização das filmagens assistidas, foi utilizado para medir o tempo de 16 oscilações para o Caso A e de 10 oscilações para o Caso B. A incerteza instrumental do cronômetro leva em conta o tempo de reação da pessoa que realiza a medida e, portanto, foi estimada em  $0,4\text{s}$ . muito gde...

#### 3.2 Procedimento experimental

Foram gravados vídeos do pêndulo sendo solto, para o Caso A o pêndulo foi solto de  $(10 \pm 1)^\circ$  com os comprimentos sendo variados entre os valores:

- $(30 \pm 0,05)\text{cm}$
- $(45 \pm 0,05)\text{cm}$

incoerente

- $(50 \pm 0,05)\text{cm}$
- $(60 \pm 0,05)\text{cm}$
- $(75 \pm 0,05)\text{cm}$
- $(90 \pm 0,05)\text{cm}$

Sendo  $0,05\text{cm}$  a incerteza da régua, porém, como o comprimento da corda, para a fórmula 1 é calculado a partir da distância do centro de massa (CM) do limão ao topo, onde a corda está presa. Com isso, ao levar-se em conta a distância da periferia do limão ao CM e a incerteza estimada para esse cálculo, tem-se que os valores do comprimento (L) são:

- $(32,5 \pm 0,5)\text{cm}$
- $(47,5 \pm 0,5)\text{cm}$
- $(52,5 \pm 0,5)\text{cm}$
- $(62,5 \pm 0,5)\text{cm}$
- $(77,5 \pm 0,5)\text{cm}$
- $(92,5 \pm 0,5)\text{cm}$

medida já era em relação ao centro do limão...

não faz diferença, mas eu acho que falei  $120 \pm 10\text{g}$

Para o Caso B, os diferentes valores de ângulo inicial supracitados, são de um pêndulo com  $(52,5 \pm 0,5)\text{cm}$ . Ao visualizar esses vídeos para os diferentes Casos, o cronômetro foi utilizado para medir o intervalo de tempo para o período de oscilações definido para cada caso. A massa do limão foi estimada em  $(100 \pm 5)\text{g}$ .

Após a coleta dos valores do período de oscilação do pêndulo, foi encontrado o valor médio de cada período de oscilação e sua respectiva incerteza por meio das equações:

$$t_{med} = \frac{t_1 + t_2 + \dots + t_n}{n} \quad (3)$$

$$\sigma_e = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (t_i - t_{med})^2}{n-1}}}{\sqrt{n}} \quad (4)$$

A partir da incerteza instrumental ( $\sigma_i$ ) e da incerteza estatística ( $\sigma_e$ ) encontrada por meio da fórmula 4, encontra-se a incerteza final ( $\sigma_f$ ) por meio da relação:

$$\sigma_f = \sqrt{\sigma_i^2 + \sigma_e^2} \quad (5)$$

Como para o Caso A foi obtida a medida de 16 oscilações ( $t_{16}$ ), para obter-se o valor de uma oscilação ( $t_{1A}$ ), e propagar a incerteza final das oscilações, utiliza-se:

$$t_{1A} = \frac{t_{16_{med}}}{16} \quad (6)$$

$$\sigma_{1A} = \frac{\sigma_{16}}{16}$$

Já para o Caso B, foi obtida a medida de 10 oscilações ( $t_{10}$ ), para se ter o valor de uma oscilação ( $t_{1B}$ ) e propagar a incerteza final das oscilações, usa-se:

$$t_{1B} = \frac{t_{10_{med}}}{10} \quad (7)$$

$$\sigma_{1B} = \frac{\sigma_{10}}{10}$$

Depois do procedimento citado acima de coletar o período de uma oscilação junto de sua incerteza, o Caso A e o Caso B vão para diferentes caminhos de análise:

- Caso A: A partir dos valores encontrados para o período de uma oscilação e os valores do comprimento do fio do pêndulo, pode-se aplicar a fórmula 1 para encontrar o valor da aceleração gravitacional local (g), e propagar a incerteza de t e de L por meio da fórmula:

$$g(L, t) = \frac{4\pi^2 \cdot L}{t^2}$$

$$\sigma_g = \sqrt{\left(\frac{\partial g}{\partial L}\right)^2 \cdot \sigma_L^2 + \left(\frac{\partial g}{\partial t}\right)^2 \cdot \sigma_t^2}$$

$$\sigma_g = \frac{4\pi^2}{t^3} \sqrt{t^2 \sigma_L^2 + 4L^2 \sigma_t^2}$$

Após encontrar um valor de g para cada um dos comprimentos analisados no experimento, faz-se a média ponderada para os valores encontrados:

$$g_{med} = \frac{\sum_{i=1}^n g_i \cdot \sigma g_i}{\sum_{i=1}^n \sigma g_i} \quad (8)$$

E sua incerteza pode ser obtida por:

$$\sigma g_{med} = \sqrt{\frac{1}{\sum_{i=1}^n \sigma g_i}}$$

- Caso B: Adiante aos valores encontrados para o período de uma oscilação, encontrou-se valores teóricos para o período por meio da fórmula 1, e a incerteza do t teórico foi encontrada por:

$$t(L) = 2\pi \sqrt{\frac{L}{g}}$$

$$\sigma_t = \frac{\partial t}{\partial L} \sigma_L$$

$$\sigma_t = \frac{\pi}{\sqrt{g \cdot L}}$$

Assim, fez-se o teste Z entre o valor experimental encontrado na equação 7 e o valor teórico com sua incerteza:

$$z = \frac{|t_{teorico} - t_{1B}|}{\sqrt{\sigma t_{teorico}^2 + \sigma t_{1B}^2}}$$

Após isso, será plotado um gráfico por meio do método dos mínimos quadrados, e com ele, deve ser possível notar o desvio, causado pela aproximação de ângulos pequenos da fórmula 2.

- Método dos mínimos quadrados: Seja Q(x) e p(x) funções do tipo ax+b. Para definir as funções m(x) e n(x) que se ajustam aos dados analisados, onde m(x) para os dados do Caso A e n(x) será modelada para os dados do Caso B, utiliza-se o método dos mínimos quadrados, que consiste em ajustar curvas aos dados a partir da soma dos quadrados dos resíduos. A partir da definição de resíduo (distância

entre o ponto experimental e a curva a ser ajustada) pode-se definir a seguinte função:

$$g = y - p(x) \quad (9)$$

Onde g representa o resíduo, y o ponto experimental e p(x) a curva a ser ajustada. De (9) pode-se definir (10), lembrando que a soma deve ser feita quadraticamente para evitar valores negativos e positivos, que somados podem fornecer um resultado muito pequeno, o que levará a um ajuste ruim.

$$Q = \sum_{i=1}^n q_i = \sum_{i=1}^n \frac{[y_i - f(x_i)]^2}{\sigma_i^2} \quad (10)$$

A partir da soma quadrática de g, e levando em consideração os pesos estatísticos dos dados ( $\frac{1}{\sigma^2}$ ), será definida P, onde o mínimo dessa função fornecerá os ajustes m(x) e n(x). Minimizando P chega-se nas seguintes soluções:

$$a = \frac{S_{xy}S_1 - S_yS_x}{S_{x^2}S_1 - (S_x)^2}$$

$$b = \frac{S_yS_{x^2} - S_{xy}S_x}{S_{x^2}S_1 - (S_x)^2}$$

$$\sigma_a = \sqrt{\frac{S_1}{S_{x^2}S_1 - (S_x)^2}}$$

$$\sigma_b = \sqrt{\frac{S_{x^2}}{S_{x^2}S_1 - (S_x)^2}}$$

Com os valores de a e b encontrados, e suas incertezas, a reta será ajustada.

## 4 Resultados de medições, cálculos e análise de dados

As tabelas e gráficos obtidos a partir dos procedimentos experimentais desenvolvidos acima, estão a seguir:

Dependência do período com comprimento								
L (cm)	$\sigma L$ (cm)	T16 (1)	T16 (2)	T16 (3)	T16 (4)	T16 (5)	T16 (6)	$\sigma T_{inst}$
32,5	0,5	17,1	17,47	17,1	17,3	17,1	17,2	0,4
47,5	0,5	21,6	21,7	21,7	21,6	21,6	21,7	0,4
52,5	0,5	22,4	22,7	22,4	22,4	22,5	22,4	0,4
62,5	0,5	24,8	24,7	24,3	24,9	24,6	25	0,4
77,5	0,5	27,8	27,8	27,7	27,7	27,8	27,8	0,4
90	0,5	30,5	30,5	30,5	30,4	30,4	30,3	0,4

Figura 3: Tabela do Caso A

L (cm)	$\sigma L$ (cm)	$\sqrt{L}$	$\sigma \sqrt{L}$	T1 (s)	$\sigma T1$ (s)	$g_{exp}$ (m/s <sup>2</sup> )	$\sigma g_{exp}$ (m/s <sup>2</sup> )	$g_{med}$	$\sigma g_{med}$
32,5	0,5	5,7	0,1	1,07	0,03	11,2	0,6	10,4	0,2
47,5	0,5	6,9	0,1	1,35	0,03	10,2	0,5		
52,5	0,5	7,2	0,1	1,40	0,03	10,5	0,5	TesteZ	
62,5	0,5	7,9	0,1	1,54	0,03	10,3	0,5		
77,5	0,5	8,8	0,1	1,74	0,03	10,2	0,5	2,78	
90,0	0,5	9,5	0,1	1,90	0,03	10,1	0,5		

Figura 4: Tabela do cálculo de g no Caso A

X	$\sigma x$	Y	$\sigma y$								
T1		$\sqrt{L}$	$inc \sqrt{L}$	$XY/(\sigma y^2)$	$(X/\sigma y)^2$	$X/(\sigma y^2)$	$Y/(\sigma y^2)$	$1/(\sigma y^2)$	a	b	
1,07		5,7	0,2	241	45	42	225	39	4,6	0,7	
1,35		6,9	0,1	432	85	63	319	46			
1,40		7,2	0,1	489	95	67	348	48	$\sigma a$	$\sigma b$	
1,54		7,9	0,1	622	122	79	403	51	0,2	0,3	
1,74		8,8	0,1	830	164	94	478	54			
1,90		9,5	0,1	1019	204	107	536	56			
				$\sum xy$	$\sum x^2$	$\sum x$	$\sum y$	$\sum 1$			
				3633	714	453	2309	296			

Figura 5: Tabela da primeira interação do Caso A

X	$\sigma x$	Y	$\sigma y$								
T1	$inc t1$	$\sqrt{L}$	$inc \sqrt{L}$	$XY/(\sigma y^2)$	$(X/\sigma y)^2$	$X/(\sigma y^2)$	$Y/(\sigma y^2)$	$1/(\sigma y^2)$	a	b	
1,07	0,03	5,7	0,1	509	96	89	474	83	4,6	0,7	
1,35	0,03	6,9	0,1	1134	223	165	838	122			
1,40	0,03	7,2	0,1	1367	265	189	974	134	$\sigma a$	$\sigma b$	
1,54	0,03	7,9	0,1	1954	382	247	1265	160	0,1	0,2	
1,74	0,03	8,8	0,1	3031	598	344	1747	198			
1,90	0,03	9,5	0,1	4158	834	438	2186	230			
				$\sum xy$	$\sum x^2$	$\sum x$	$\sum y$	$\sum 1$			
				12153	2396	1472	7483	928			

Figura 6: Tabela do MMQ no Caso A

incoerente

L	inc L	Dependência do período com ângulo inicial						
52,5	1							
ang0 (°)	σ ang0 (°)	T10 (1)	T10 (2)	T10 (3)	T10 (4)	T10 (5)	T10 (6)	σTinst
5	1	13,96	14	14,03	14,08	14,05	14,01	0,4
10	1	14,05	14,16	13,99	14,06	14,23	14,1	0,4
15	1	13,99	14,19	14,23	14,07	14,07	14,25	0,4
20	1	14,09	14,3	14,1	14,15	14,1	14,16	0,4
30	1	14,49	14,51	14,41	14,45	14,37	14,4	0,4
45	1	14,65	14,71	14,69	14,65	14,7	14,59	0,4

Figura 7: Tabela do Caso B

que valores usou?

ang0 (°)	σ ang0 (°)	T (s)	σ T (s)	T <sub>teórico</sub> (s)	σ T <sub>teo</sub> (s)	Teste Z
5	1	1,40	0,04	1,42	0,01	0,42
10	1	1,41	0,04	1,42	0,01	0,24
15	1	1,41	0,04	1,42	0,01	0,16
20	1	1,42	0,04	1,42	0,01	0,12
30	1	1,44	0,04	1,42	0,01	0,56
45	1	1,47	0,04	1,42	0,01	1,09

Figura 8: Tabela do teste Z com o t teórico no Caso B

X	σx	Y	σy							
ang 0		T1	inc t1	XY/(σy <sup>2</sup> )	(X/σy) <sup>2</sup>	X/(σy <sup>2</sup> )	Y/(σy <sup>2</sup> )	1/(σy <sup>2</sup> )	a	b
5		1,40	0,04	4366	15570	3114	873	622	0,002	1,39
10		1,41	0,04	8730	61920	6192	873	619		
15		1,41	0,04	13078	138803	9254	872	617	σa	σb
20		1,42	0,04	17543	247961	12398	877	620	0,001	0,03
30		1,44	0,04	26942	559800	18660	898	622		
45		1,47	0,04	41089	1260840	28019	913	623		
				Sxy	Sx <sup>2</sup>	Sx	Sy	S1		
				111749	2284894	77636	5306	3723		

Figura 9: Tabela da primeira interação do Caso B

X	σx	Y	σy							
ang 0	inc ang0	T1	inc t1	XY/(σy <sup>2</sup> )	(X/σy) <sup>2</sup>	X/(σy <sup>2</sup> )	Y/(σy <sup>2</sup> )	1/(σy <sup>2</sup> )	a	b
5	1	1,40	0,04	4374	15597	3119	875	624	0,002	1,39
10	1	1,41	0,04	8745	62026	6203	874	620		
15	1	1,41	0,04	13101	139040	9269	873	618	σa	σb
20	1	1,42	0,04	17573	248385	12419	879	621	0,001	0,03
30	1	1,44	0,04	26988	560761	18692	900	623		
45	1	1,47	0,04	41160	1263007	28067	915	624		
				Sxy	Sx <sup>2</sup>	Sx	Sy	S1		
				111941	2288816	77769	5316	3730		

Figura 10: Tabela do MMQ do Caso B

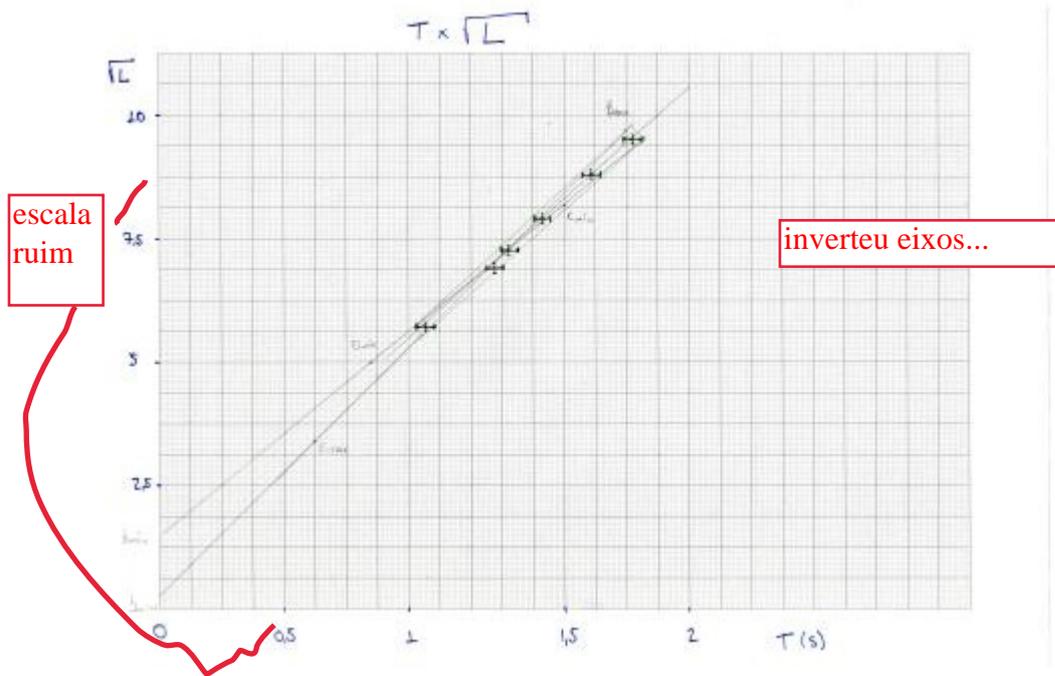


Figura 11: Gráfico do período (t) por  $\sqrt{L}$

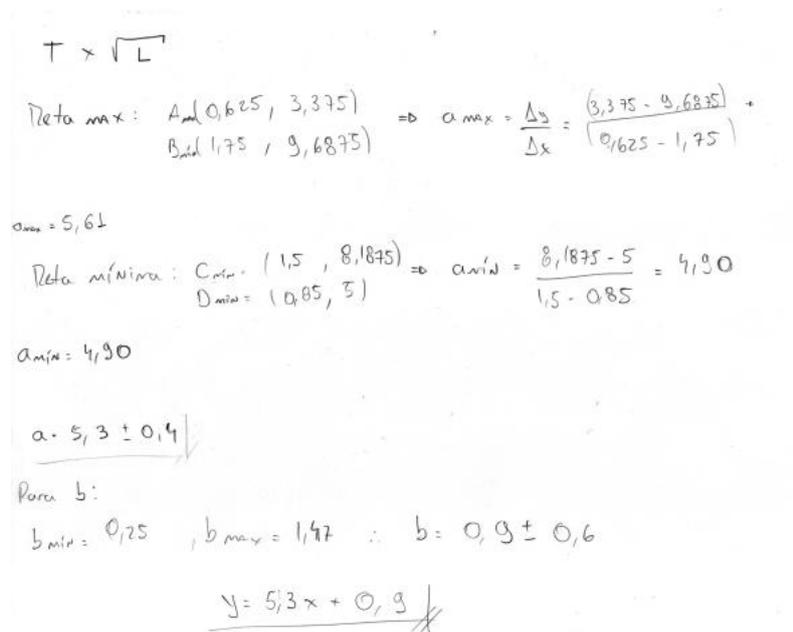


Figura 12: Ajuste gráfico a partir da reta máxima e mínima para o gráfico do período de oscilação (t) por  $\sqrt{L}$

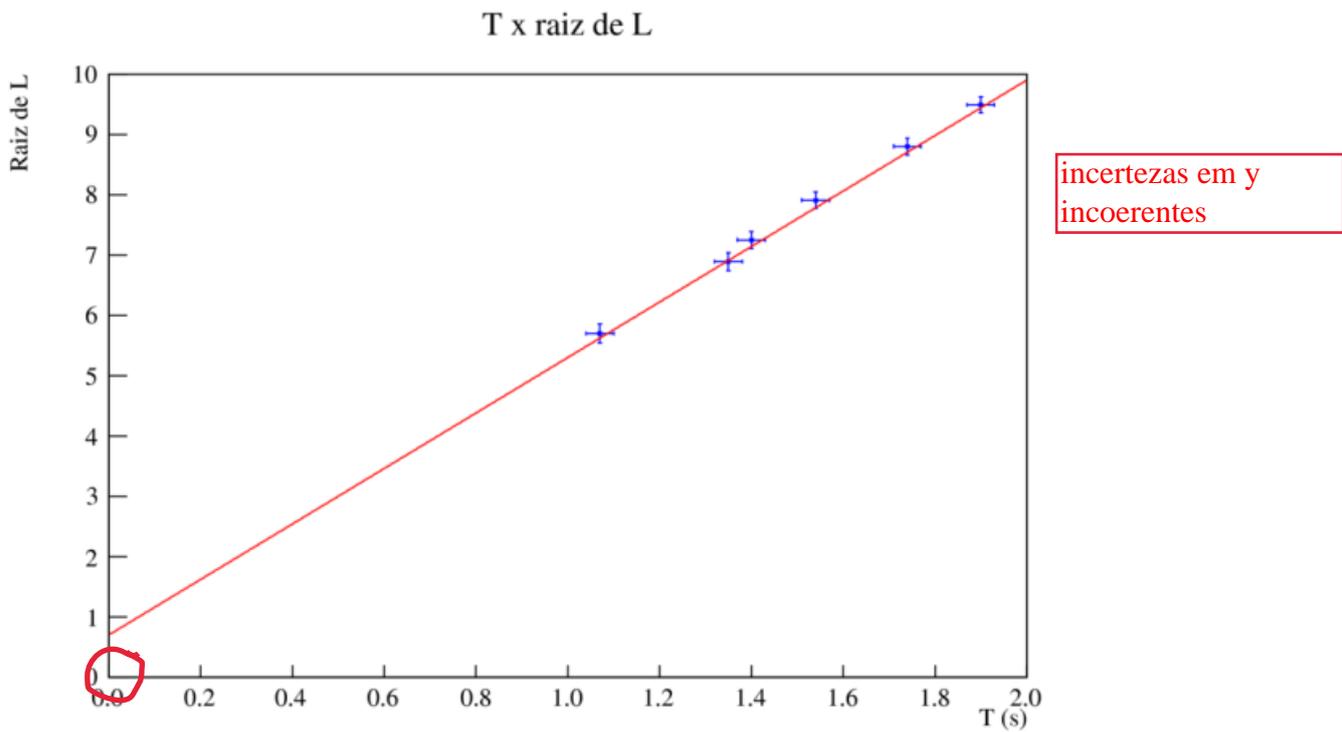


Figura 13: Gráfico do período de oscilação ( $t$ ) por  $\sqrt{L}$ , por MMQ



Figura 14: Gráfico do período ( $t$ ) pelo ângulo de soltura

T x ângulo

Reta máx:  $A_{\max} (15, 1,499)$   
 $B_{\max} (15, 1,397) \Rightarrow a_{\max} = \frac{0,102}{30} = 0,0034$

Reta mín:  $A_{\min} (40, 1,432)$   
 $D_{\min} (10, 1,439) \Rightarrow a_{\min} = \frac{0,007}{30} = 0,0002$

$a_{\text{med}} = 0,002 \pm 0,002$

$b_{\min} = 1,392 \rightarrow b_{\text{med}} = 1,39 \pm 0,05$   
 $b_{\max} = 1,441$

$y = 0,002x + 1,39$

Figura 15: Ajuste gráfico a partir da reta máxima e mínima para o gráfico do período (t) pelo ângulo de soltura

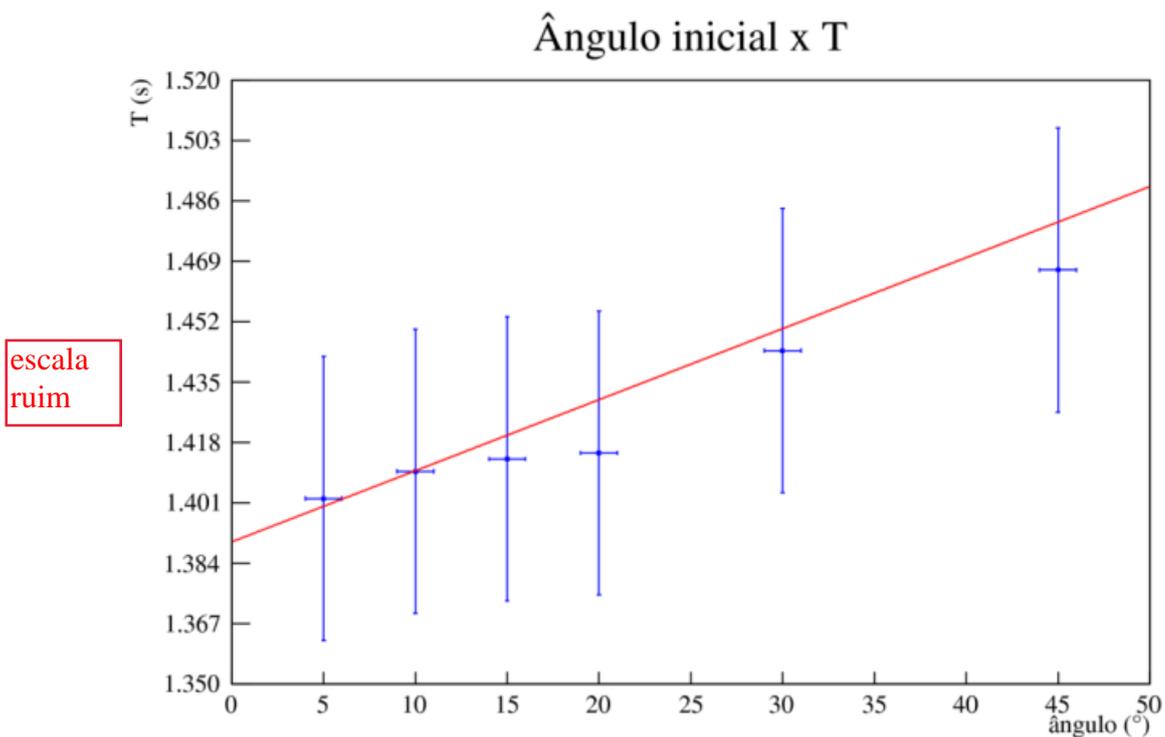


Figura 16: Gráfico do período (t) pelo ângulo de soltura, por MMQ

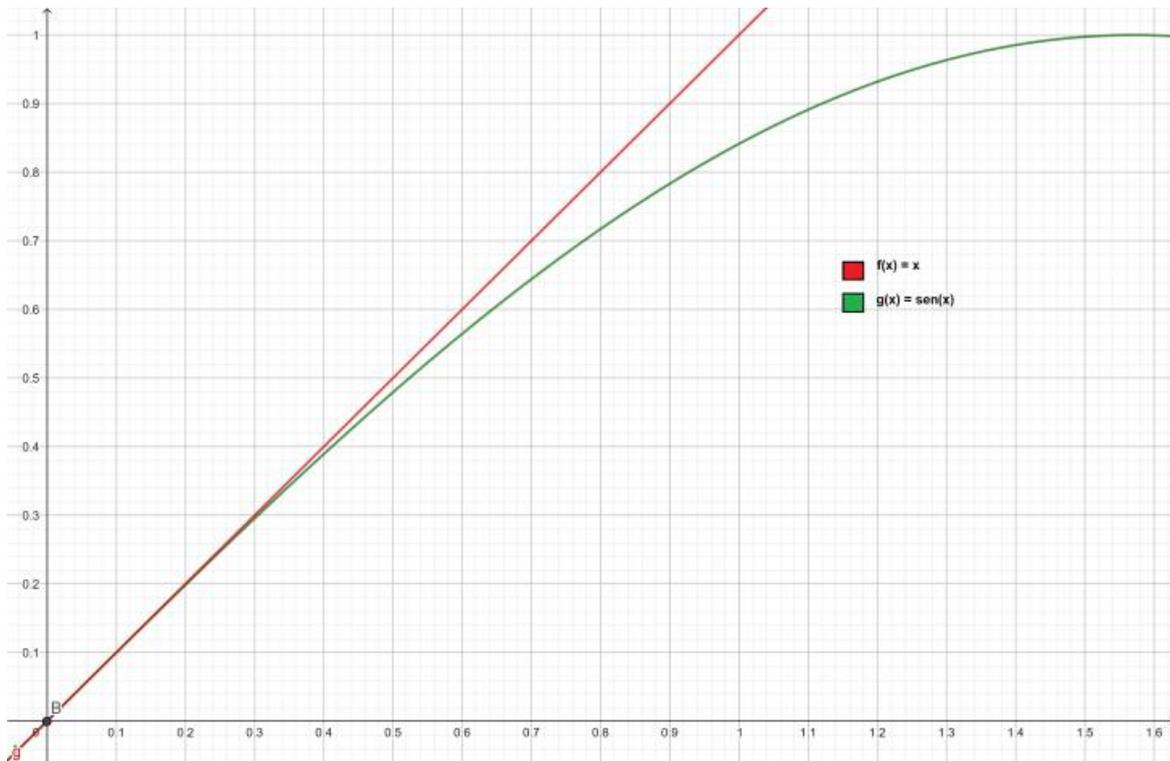


Figura 17: Gráfico da reta  $y=x$  e da senóide  $y=\text{sen } x$

Como podemos ver na imagem 16, para os valores de ângulo até o dado de  $20^\circ$  pode-se, facilmente, traçar uma reta constante, com coeficiente angular nulo. Enquanto que para os outros dados, o valor do período parece levar em conta o ângulo de soltura, enquanto que na equação 1, o período não depende do ângulo inicial. Assim, os dois últimos dados no gráfico de ângulo inicial por período, são flutuações, para os quais a fórmula não completamente válida, tanto que, caso fosse traçada uma reta constante nos 4 valores iniciais, ela não passaria nem pelo intervalo de incerteza do último valor. Assim, o gráfico comprova as limitações da aproximação feita na equação 2, que só é válida para ângulos pequenos. O intervalo de "ângulos pequenos" para essa aproximação, como pode-se ver no gráfico, começa a destoar a partir dos  $20^\circ$ , ou  $\frac{\pi}{9}$  radianos.

dentro de 1 sigma...

$$\frac{\pi}{9} \approx 0,35$$

pq não fez o ajuste para t constante?

Na imagem 17, para  $x = 0,35$ , as imagens de  $y=x$  e  $y=\text{sen } x$  começam a se afastar, mostrando que o limite teórico da aproximação está coincidente com o limite visível nos dados experimentais.

não com seu ajuste...

## 5 Discussão final e conclusões

As expectativas iniciais e os objetivos comentados na seção 2 foram atingidos. A aceleração gravitacional foi calculada por meio da média ponderada e dos dados coletados. A compatibilidade ao nível 3 sigmas pode ser explicada pela inexatidão dos dados experimentais, pois, como supracitado, o limão não teve seu raio medido diretamente e, sua distribuição de massa não é homogênea e, assim, entende-se que o centro geométrico não coincide com o centro de massa. Ademais, o experimento foi realizado de forma caseira, a medida do ângulo de soltura também foi afetada, bem como o tempo de acionamento do cronômetro. Assim, as flutuações encontradas, no valor da gravidade e na imagem 16, que o valor do período, para os quatro primeiros dados, deveria ser constante, podem ser explicadas por meio das próprias limitações nos equipamentos utilizados para se realizar o experimento. Porém, as incertezas estimadas se provaram suficientes, os valores foram compatíveis dentro de seus intervalos de erro.

incertezas gdes....

## 6 Referências bibliográficas

Física Experimental I de J. H. Vuolo foi utilizado para consulta quanto ao procedimento de elaborar o relatório e ao cálculo das incertezas.

Geogebra foi utilizado na elaboração da imagem 17.

Os textos enviados por e-mail, bem como o vídeo do Professor Osvaldo Camargo Botelho dos Santos, foram utilizados para elaborar os gráficos com o MMQ.