

Sapienza Università di Roma
Laboratorio di Meccanica
PPI1-Molla

Giulio Russo

6 maggio 2021

Indice

| | | |
|----------|---|----------|
| 1 | Scopo dell'esperienza | 2 |
| 2 | Apparato sperimentale | 2 |
| 2.1 | Campioni | 2 |
| 2.2 | Accorgimenti e consigli | 2 |
| 2.3 | Strumenti di misura | 2 |
| 3 | Strategia di misura | 3 |
| 3.1 | Molla | 3 |
| 3.1.1 | Passaggi riassuntivi | 4 |
| 3.2 | Formule generali | 4 |
| 3.3 | Propagazione incertezze | 4 |
| 3.4 | Fit lineare | 5 |
| 3.4.1 | Metodo dei minimi quadrati | 5 |
| 4 | Operazioni sperimentali | 6 |
| 4.1 | Misure dirette | 6 |
| 4.1.1 | Massa m | 6 |
| 4.1.2 | Posizione di equilibrio x_{eq} | 6 |
| 4.1.3 | Periodo T_{osc} | 7 |
| 4.1.4 | Valori finali | 7 |
| 4.1.5 | Istogrammi periodo singola oscillazione | 8 |
| 4.2 | Misura di k | 8 |
| 4.3 | Misura di g | 9 |
| 4.3.1 | Considerazioni sul valore sperimentale di g | 10 |

1 Scopo dell'esperienza

- Eseguire misure dirette di massa, lunghezza e tempo.
- Misura della costante elastica di una molla.
- Misura dell'accelerazione di gravità.

2 Apparato sperimentale

- Una molla appesa ad un supporto con carta millimetrata per effettuare misure di allungamento.
- Una bilancia digitale per la misura dei dischetti.
- Un cronometro a lettura digitale per le misure di periodo.
- Una squadra per ridurre l'errore di parallasse nella misura di allungamento.

2.1 Campioni

- 10 dischetti che si possono appendere alla molla.

2.2 Accorgimenti e consigli

- Attenzione a non allungare eccessivamente la molla rispetto alle condizioni di equilibrio per la misura di periodo (circa 1-1.5 cm).
- Fare attenzione che la molla non urti la parte superiore quando è al minimo della lunghezza in quanto altera le misure di periodo.
- Assicurarsi che le oscillazioni della molla siano, per quanto possibile, verticali e unidimensionali.

2.3 Strumenti di misura

In Tabella 2.1 sono riassunte le caratteristiche degli strumenti usati.

- **Bilancia di precisione.** La risoluzione è pari a 0.1 g. L'incertezza di tipo B associata alla risoluzione dello strumento è quindi $\frac{RIS}{\sqrt{12}} = \frac{0.1\text{ g}}{\sqrt{12}} = 0.03\text{ g}$.
La portata è pari a 3 kg. Eseguendo la misura di massa nulla il valore mostrato sul display è esattamente zero; si assume quindi che l'offset dello strumento sia trascurabile.
- **Cronometro.** La risoluzione è pari a 0.01 s. L'incertezza di tipo B associata alla risoluzione dello strumento è quindi $\frac{RIS}{\sqrt{12}} = \frac{0.01\text{ s}}{\sqrt{12}} = 0.003\text{ s}$.
- **Carta millimetrata.** La risoluzione è pari a 1 mm. L'incertezza di tipo B associata alla risoluzione dello strumento è quindi $\frac{RIS}{\sqrt{12}} = \frac{0.001\text{ m}}{\sqrt{12}} = 0.0003\text{ m}$.
La portata è pari a 28 cm. L'offset dello strumento è trascurabile.

| Strumento | Portata | Risoluzione | σ_B | Offset |
|------------------------|---------|-------------|------------|--------|
| Bilancia di precisione | 3 kg | 0.1 g | 0.03 g | - |
| Cronometro | - | 0.01 s | 0.003 s | - |
| Carta millimetrata | 28 cm | 1 mm | 0.3 mm | - |

Tabella 2.1: Caratteristiche degli strumenti usati e incertezze associate alla singola misura. Sono inoltre riportati gli eventuali fattori correttivi di offset e di scala.

3 Strategia di misura

3.1 Molla

Un corpo di massa M soggetto alla sola forza elastica segue la legge di Hooke in una dimensione:

$$\begin{aligned} F &= -k\Delta x \\ M\ddot{x} &= -k(x - x_0) \end{aligned} \quad (3.1)$$

con k costante elastica della molla e x_0 lunghezza a riposo della molla. La soluzione generale di questa equazione differenziale è

$$x(t) = A \cos(\omega t + \varphi) + x_0 \quad (3.2)$$

con $\omega = \sqrt{\frac{k}{M}}$. Il periodo di oscillazione è legato alla pulsazione ω dalla relazione

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = 2\pi \sqrt{\frac{M}{k}}. \quad (3.3)$$

Nel caso di una massa M appesa ad una molla c'è un termine in più dovuto alla forza peso (g è l'accelerazione di gravità). L'equazione del moto diventa quindi

$$F = -k(x - x_0) + Mg = M\ddot{x} \quad (3.4)$$

che ha come soluzione

$$x(t) = A \cos(\omega t + \varphi) + \frac{Mg}{k} + x_0 \quad (3.5)$$

con periodo di oscillazione uguale al caso precedente.

Nel caso statico (senza oscillazione, $\dot{x} = 0$ e $\ddot{x} = 0$) la posizione di equilibrio corrisponde a

$$x_{eq} = \frac{Mg}{k} + x_0. \quad (3.6)$$

In questo esperimento non conosciamo la massa totale M dell'oscillatore ma solo la massa m dei dischi che aggiungiamo; possiamo quindi riscrivere $M = (m_0 + m)$ dove m_0 è la massa della molla (incluso il supporto ad essa collegato) senza dischi. Anche la lunghezza a riposo della molla non è nota poiché la molla comincia ad allungarsi solo con una sollecitazione sufficientemente intensa.

Dall'equazione del periodo (3.3) ricaviamo quindi la seguente relazione:

$$T^2 = 4\pi^2(m_0 + m)/k. \quad (3.7)$$

Eseguendo misure di periodo per due diverse masse otteniamo una formula per calcolare la costante elastica k della molla:

$$\begin{aligned} T_1^2 &= 4\pi^2(m_0 + m_1)/k; \\ T_2^2 &= 4\pi^2(m_0 + m_2)/k; \\ T_2^2 - T_1^2 &= 4\pi^2(m_2 - m_1)/k; \\ k &= 4\pi^2 \frac{m_2 - m_1}{T_2^2 - T_1^2}. \end{aligned} \quad (3.8)$$

Esplicitando k in funzione delle altre grandezze a partire dalla (3.7) e sostituendo tale valore di k in (3.6) otteniamo la relazione lineare tra x_{eq} e T^2 :

$$\begin{aligned} x_{eq} &= \frac{g}{4\pi^2} T^2 + x_0 \\ &= \alpha T^2 + x_0. \end{aligned} \quad (3.9)$$

Da questa relazione è possibile stimare l'accelerazione di gravità g .

3.1.1 Passaggi riassuntivi

È quindi possibile:

1. aggiungere diverse masse alla molla;
2. per ciascuna configurazione misurare la posizione statica di equilibrio x_{eq} e il periodo di una singola oscillazione T ;
3. calcolare il coefficiente elastico k della molla;
4. studiare l'andamento lineare di " x_{eq} in funzione di T^2 " per estrarre l'accelerazione di gravità g .

3.2 Formule generali

La miglior stima del **valore vero** di una grandezza è data dalla *media aritmetica* delle N misurazioni:

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_i x_i. \quad (3.10)$$

L'**incertezza di misura** è data dalla somma in quadratura dell'incertezza di tipo A, valutabile attraverso misure ripetute, e l'incertezza di tipo B, in cui rientrano tutte le altre informazioni a disposizione:

$$\begin{aligned} \sigma_T &= \sqrt{\sigma_A^2 + \sigma_B^2} \\ &= \sqrt{S_N(x)^2 + \sigma_B^2} \end{aligned} \quad (3.11)$$

dove $S_N(x)$ è la *deviazione standard campionaria*:

$$S_N(x) = \sqrt{\frac{\sum_i (x_i - \bar{x})^2}{N - 1}}. \quad (3.12)$$

L'incertezza di una singola misura diretta è data dalla sola incertezza di tipo B. Se le diverse misure ripetute producono sempre lo stesso risultato allora $\sigma_A = 0$. Se la deviazione standard campionaria è maggiore dell'incertezza di tipo B posso trascurare quest'ultima per il calcolo dell'incertezza totale.

La *deviazione standard della media* di N misure indipendenti di una stessa grandezza diminuisce come $1/\sqrt{N}$, di conseguenza:

$$S_N(\bar{x}) = \frac{S_N(x)}{\sqrt{N}}. \quad (3.13)$$

3.3 Propagazione incertezze

- Propagazione incertezze T^2

$$\sigma_{T^2} = \sqrt{\left(\frac{\partial T^2}{\partial T} \sigma_T\right)^2} = 2T \sigma_T \quad (3.14)$$

- Propagazione incertezze $\Delta m = m_2 - m_1$

$$\sigma_{\Delta m} = \sqrt{\left(\frac{\partial \Delta m}{\partial m_2} \sigma_{m_2}\right)^2 + \left(\frac{\partial \Delta m}{\partial m_1} \sigma_{m_1}\right)^2} = \sqrt{\sigma_{m_2}^2 + \sigma_{m_1}^2} \quad (3.15)$$

- Propagazione incertezze $\Delta T = T_2^2 - T_1^2$

$$\sigma_{\Delta T} = \sqrt{\left(\frac{\partial \Delta T}{\partial T_2^2} \sigma_{T_2^2}\right)^2 + \left(\frac{\partial \Delta T}{\partial T_1^2} \sigma_{T_1^2}\right)^2} = \sqrt{\sigma_{T_2^2}^2 + \sigma_{T_1^2}^2} \quad (3.16)$$

- Propagazione incertezze $k = 4\pi^2 \frac{\Delta m}{\Delta T}$

$$\begin{aligned} \sigma_k &= \sqrt{\left(\frac{\partial k}{\partial \Delta m} \sigma_{\Delta m}\right)^2 + \left(\frac{\partial k}{\partial \Delta T} \sigma_{\Delta T}\right)^2} \\ &= 4\pi^2 \sqrt{\left(\frac{1}{\Delta T} \sigma_{\Delta m}\right)^2 + \left(-\frac{\Delta m}{(\Delta T)^2} \sigma_{\Delta T}\right)^2} \end{aligned} \quad (3.17)$$

3.4 Fit lineare

Per *fit* si intende il processo di adattamento di una curva ai dati sperimentali.

Come descritto precedentemente (Formula 3.9), c'è una relazione lineare tra x_{eq} e T^2 :

$$x_{eq} = \alpha T^2 + x_0; \quad (3.18)$$

$$\alpha = \frac{g}{4\pi^2}. \quad (3.19)$$

Una volta ricavato α con il fit è quindi possibile stimare g :

$$g = 4\pi^2 \alpha; \quad (3.20)$$

$$\sigma_g = \sqrt{\left(\frac{\partial g}{\partial \alpha} \sigma_\alpha\right)^2} = 4\pi^2 \sigma_\alpha. \quad (3.21)$$

Per valutare in maniera quantitativa la compatibilità del valore di g così ottenuto con il valore atteso ($g_{Roma} = 9.805 \text{ m s}^{-2}$) possiamo definire la variable standardizzata

$$z = \frac{|g - g_{Roma}|}{\sigma_g}, \quad (3.22)$$

dove $|g - g_{Roma}|$ è la discrepanza dal valore atteso. z quindi è la distanza della discrepanza da 0 in unità di sigma; maggiore è il valore di z maggiore è la distanza del valore sperimentale dal valore atteso. Nel nostro caso se $z \leq 2$, ovvero se il valore sperimentale rientra entro 2σ (95.4%) dal valore di riferimento, possiamo ritenere la misura sperimentale compatibile.

3.4.1 Metodo dei minimi quadrati

Il metodo utilizzato per il fit lineare è il **metodo dei minimi quadrati**.

Data una relazione lineare tra due grandezze fisiche

$$\mu_Y = m \cdot \mu_X + c, \quad (3.23)$$

indichiamo con μ_X e μ_Y i valori veri delle grandezze e con x_i e y_i i valori osservati sperimentalmente.

Formule che legano le migliori stime dei parametri m e c ai dati sperimentali:

$$\hat{m} = E[m] = \frac{\text{Cov}[x, y]}{\text{Var}[x]} \quad (3.24)$$

$$\hat{c} = E[c] = \bar{y} - \hat{m} \cdot \bar{x} \quad (3.25)$$

$$\text{Var}[\hat{m}] = \frac{1}{\text{Var}[x] \sum_i \sigma_{y_i}^{-2}} \quad (3.26)$$

$$\text{Var}[\hat{c}] = \bar{x}^2 \cdot \text{Var}[\hat{m}] \quad (3.27)$$

$$\text{Cov}[\hat{m}, \hat{c}] = -\bar{x} \cdot \text{Var}[\hat{m}] \quad (3.28)$$

$$\rho[\hat{m}, \hat{c}] = \frac{\text{Cov}[\hat{m}, \hat{c}]}{\sqrt{\text{Var}[\hat{m}] \text{Var}[\hat{c}]}} \quad (3.29)$$

$$\sigma_{y_i} = \sqrt{\sigma_{y_i}^2 + (m \sigma_{x_i})^2} \quad (3.30)$$

L'incertezza su μ_Y è ottenuta dalla propagazione delle incertezze, tenendo conto del termine di correlazione:

$$\begin{aligned} \sigma_{\mu_Y} &= \sqrt{\left(\frac{\partial \mu_Y}{\partial m} \sigma_m\right)^2 + \left(\frac{\partial \mu_Y}{\partial c} \sigma_c\right)^2 + 2 \frac{\partial \mu_Y}{\partial m} \frac{\partial \mu_Y}{\partial c} \rho[m, c] \sigma_m \sigma_c} \\ &= \sqrt{\mu_X^2 \sigma_m^2 + \sigma_c^2 + 2 \mu_X \text{Cov}[m, c]} \end{aligned} \quad (3.31)$$

4 Operazioni sperimentali

4.1 Misure dirette

Le misure sono state effettuate in quattro configurazioni diverse: 4 dischi, 6 dischi, 8 dischi e 10 dischi.

4.1.1 Massa m

| n° | m_4 [g] | m_6 [g] | m_8 [g] | m_{10} [g] |
|-------|-----------|-----------|-----------|--------------|
| 1 | 317.7 | 475.5 | 630.4 | 788.1 |
| 2 | 317.6 | 475.5 | 630.4 | 787.9 |
| 3 | 317.7 | 475.4 | 630.4 | 788.2 |
| 4 | 317.8 | 475.6 | 630.4 | 788.3 |
| 5 | 317.7 | 475.5 | 630.3 | 788.2 |
| 6 | 317.7 | 475.2 | 630.4 | 788.3 |
| 7 | 317.6 | 475.4 | 630.4 | 788.1 |
| 8 | 317.8 | 475.5 | 630.3 | 788.2 |
| 9 | 317.8 | 475.3 | 630.3 | 788.3 |
| 10 | 317.7 | 475.4 | 630.1 | 788.3 |
| S_N | 0.0738 | 0.1160 | 0.0966 | 0.1287 |

Tabella 4.1: Misure di massa m dei dischi nelle 4 configurazioni.

4.1.2 Posizione di equilibrio x_{eq}

| n° | $x_{eq,4}$ [cm] | $x_{eq,6}$ [cm] | $x_{eq,8}$ [cm] | $x_{eq,10}$ [cm] |
|-------|-----------------|-----------------|-----------------|------------------|
| 1 | 13.0 | 16.3 | 19.6 | 23.0 |
| 2 | 12.9 | 16.2 | 19.6 | 23.0 |
| 3 | 12.9 | 16.3 | 19.5 | 23.1 |
| 4 | 12.9 | 16.3 | 19.6 | 23.0 |
| 5 | 13.0 | 16.2 | 19.6 | 23.0 |
| 6 | 12.9 | 16.3 | 19.6 | 23.0 |
| 7 | 12.9 | 16.3 | 19.6 | 23.1 |
| 8 | 12.9 | 16.3 | 19.6 | 23.0 |
| 9 | 12.9 | 16.3 | 19.6 | 23.0 |
| 10 | 12.9 | 16.2 | 19.6 | 23.0 |
| S_N | 0.0422 | 0.0483 | 0.0316 | 0.0422 |

Tabella 4.2: Misure di posizione di equilibrio x_{eq} nelle 4 configurazioni.

4.1.3 Periodo T_{5osc}

| n° | $T_{5osc,4}$ [s] | $T_{5osc,6}$ [s] | $T_{5osc,8}$ [s] | $T_{5osc,10}$ [s] |
|-------|------------------|------------------|------------------|-------------------|
| 1 | 2.81 | 3.51 | 3.90 | 4.40 |
| 2 | 2.91 | 3.44 | 3.89 | 4.40 |
| 3 | 2.76 | 3.39 | 3.95 | 4.34 |
| 4 | 2.81 | 3.38 | 3.83 | 4.32 |
| 5 | 2.76 | 3.44 | 3.91 | 4.27 |
| 6 | 2.91 | 3.40 | 3.81 | 4.34 |
| 7 | 2.82 | 3.51 | 3.84 | 4.32 |
| 8 | 2.75 | 3.41 | 3.90 | 4.37 |
| 9 | 2.81 | 3.32 | 3.84 | 4.25 |
| 10 | 2.82 | 3.34 | 3.88 | 4.35 |
| S_N | 0.0562 | 0.0633 | 0.0435 | 0.0493 |

Tabella 4.3: Misure del tempo complessivo di 5 oscillazioni T_{5osc} nelle 4 configurazioni.

4.1.4 Valori finali

| | m [g] | x_{eq} [cm] | T [s] | T^2 [s ²] |
|-----------|---------------------|--------------------|---------------------|-------------------------|
| 4 dischi | 317.710 ± 0.023 | 12.920 ± 0.013 | 0.5632 ± 0.0036 | 0.317 ± 0.004 |
| 6 dischi | 475.430 ± 0.037 | 16.270 ± 0.015 | 0.683 ± 0.004 | 0.4664 ± 0.0055 |
| 8 dischi | 630.340 ± 0.031 | 19.59 ± 0.01 | 0.7750 ± 0.0028 | 0.6007 ± 0.0043 |
| 10 dischi | 788.190 ± 0.041 | 23.020 ± 0.013 | 0.8672 ± 0.0031 | 0.7521 ± 0.0054 |

Tabella 4.4: Misure di massa m , posizione di equilibrio x_{eq} , periodo di una singola oscillazione T e periodo al quadrato T^2 nelle 4 configurazioni con le corrispondenti incertezze.

4.1.5 Istogrammi periodo singola oscillazione

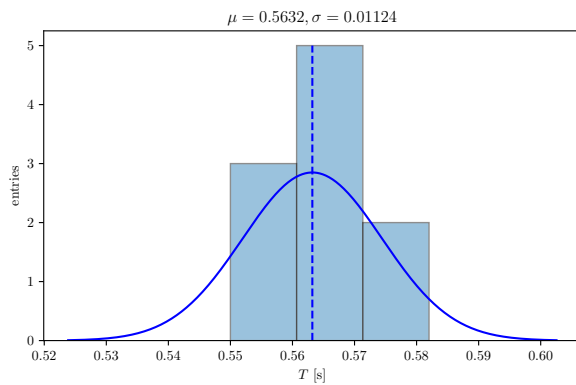


Figura 4.1: Periodo singola oscillazione 4 dischi.

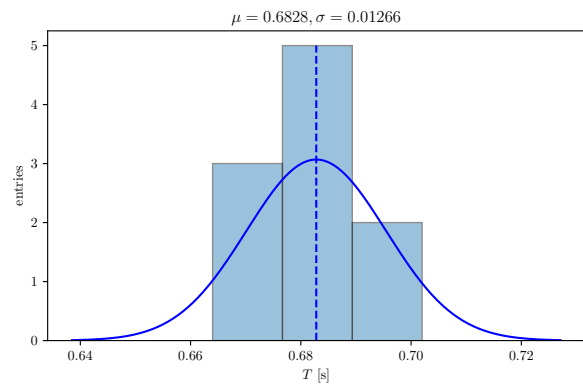


Figura 4.2: Periodo singola oscillazione 6 dischi.

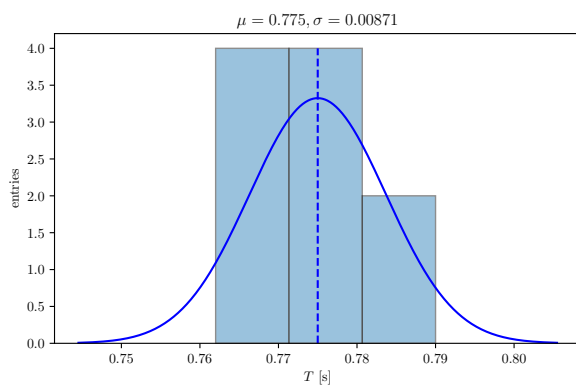


Figura 4.3: Periodo singola oscillazione 8 dischi.

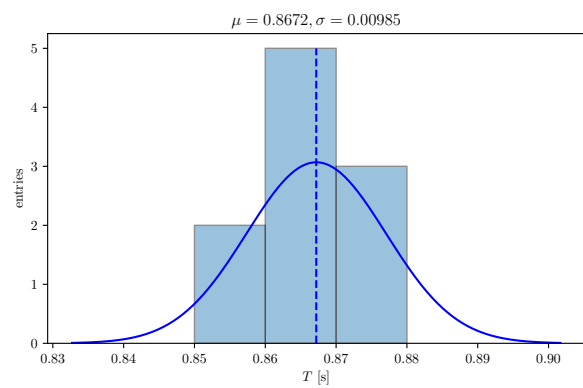


Figura 4.4: Periodo singola oscillazione 10 dischi.

4.2 Misura di k

| | valore | σ | unità |
|-----|--------|----------|-------------------|
| k | 42.72 | 0.66 | N m^{-1} |

Tabella 4.5: Risultato finale per la costante elastica della molla k con la corrispondente incertezza.

4.3 Misura di g

Stimando in maniera preliminare il coefficiente angolare con le $\sigma_{x_i} = 0$ si ottiene $\alpha = 23.372185935$. Usando questo α per calcolare le σ_{y_i} (Formula 3.30) e ripetendo il fit lineare si ottengono i seguenti valori:

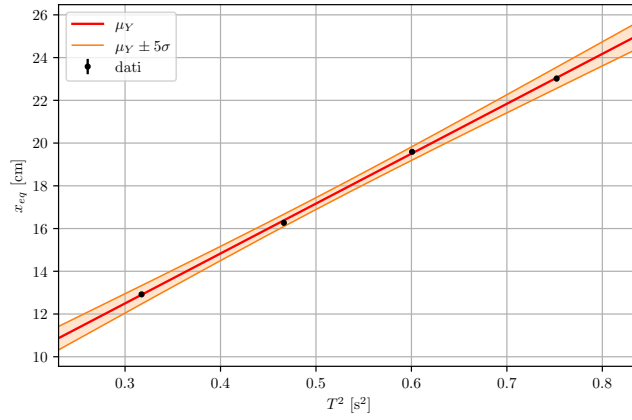


Figura 4.5: Fit lineare.

| | valore | unità |
|----------------------------|--------------|-------------------|
| \bar{x} | 0.5105315019 | s ² |
| \bar{y} | 17.414106141 | cm |
| $\overline{x^2}$ | 0.2867690409 | s ⁴ |
| \overline{xy} | 9.5005831583 | s ² cm |
| $\text{Var}[x]$ | 0.0261266264 | s ⁴ |
| $\text{Cov}[x, y]$ | 0.6101333948 | s ² cm |
| $\sum_i \sigma_{y_i}^{-2}$ | 332.36736075 | cm ⁻² |

Figura 4.6: Quantità utilizzate come input nel fit lineare. $y = x_{eq}$, $x = T^2$, $\sigma_{y_i} =$ incertezze finali associate alle y_i tenendo conto anche delle incertezze sulle x_i .

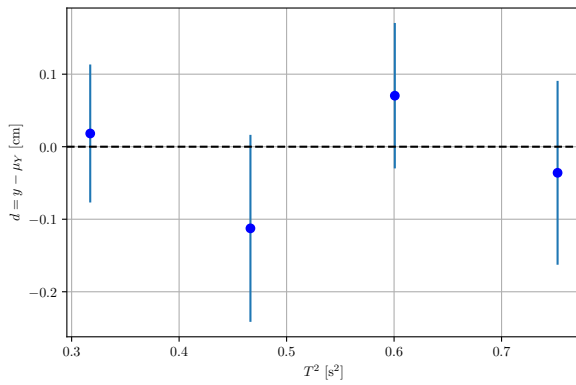


Figura 4.7: Residui.

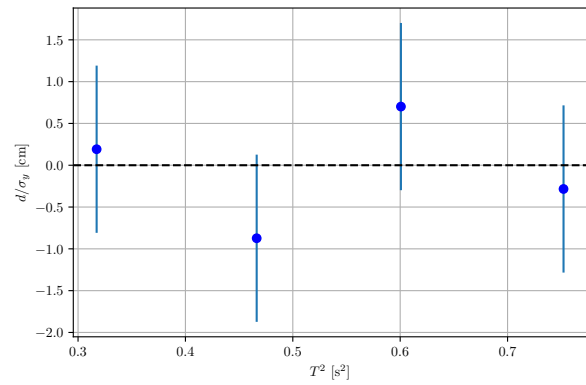


Figura 4.8: Residui standardizzati.

| | valore | σ | unità |
|----------|--------|----------|--------------------|
| α | 23.35 | 0.34 | cm s ⁻² |
| x_0 | 5.49 | 0.18 | cm |

Tabella 4.6: Risultato del fit lineare $x_{eq} = \alpha T^2 + x_0$. Migliori stime dei parametri α e x_0 con le relative incertezze.

| | valore | σ | unità |
|-----|--------|----------|-------------------|
| g | 9.22 | 0.13 | m s^{-2} |

Tabella 4.7: Risultato finale per l'accelerazione di gravità g con la corrispondente incertezza.

4.3.1 Considerazioni sul valore sperimentale di g

$$z = \frac{|g - g_{Roma}|}{\sigma_g} = 4.37$$

È evidente un'elevata discrepanza dal valore atteso. Questo è dovuto probabilmente a diversi fattori: il tempo di reazione durante le misure dei periodi, la non perfetta oscillazione verticale della molla e la non perfetta lettura delle x_{eq} dovuta ad un probabile errore di parallasse (nonostante l'utilizzo della squadra).