

Barletta Valentina

Gruppo 8

a.a 2019/2020

**Esperienza Rotaia a cuscino
d'aria 1**

Introduzione e scopo dell'esperienza

Un sistema di aria compressa esterno introduce aria all'interno di una barra metallica cava. La barra metallica costituisce la rotaia sulla quale un carrellino può muoversi lungo la stessa. Tramite dei fori applicati sulla superficie della rotaia, l'aria compressa fuoriesce, creando un cuscinetto d'aria tra il piano e il carrellino. In questo modo le forze d'attrito tra la rotaia e il corpo diventano trascurabili.

Il carrellino è collegato alla sua estremità tramite un filo inestensibile e di massa trascurabile e, attraverso una carrucola, ad un peso. Il moto del carrello è assicurato dalla caduta del peso che genera una forza costante (la forza peso). Se il pesetto viene lasciato cadere liberamente fino al suolo, il moto a cui il carrello è soggetto è di tipo uniformemente accelerato. Per studiare il moto rettilineo uniforme, è impiegato un piatto che ha lo scopo di fermare la caduta del peso. Dal momento in cui il peso si ferma il carrellino, non essendo più soggetto alla forza peso, si muoverà con velocità costante, descrivendo un moto rettilineo uniforme.

Lo scopo dell'esperienza è quello di studiare il moto rettilineo uniforme e nello specifico confrontare la velocità media con quella istantanea.

Strumentazione usata

- Carrello di massa $m_c = (98 \pm 1) \text{ g}$
- Asta graduata con errore di sensibilità del millimetro (10^{-3}m)
- Bandierina di spessore costante: $(4,85 \pm 0,01) \text{ mm}$
- Peso di massa $m_p = (5 \pm 1) \text{ g}$
- Fotocellule di sensibilità:
 - tempo di passaggio: 10^{-4} s
 - tempo di oscuramento: 10^{-5} s

Raccolta dati

Procedimento

Il carrellino è mantenuto fermo al supporto tramite un sistema elettro-magnetico, che garantisce di non introdurre ulteriori forze esterne non misurabili.

Si posiziona la prima fotocellula ad una distanza dallo start tale che sia maggiore del tratto di caduta del pesino. Questo assicura che la discrepanza tra il tempo di moto uniformemente accelerato e quello rettilineo uniforme sia minima.

Definite le suddette condizioni e sganciato il carrello, l'esperienza si divide in due fasi:

Fase A:

Si acquisiscono per 30 volte i tempi di passaggio (t_1) e di oscuramento (t_{EA1}) della bandierina applicata al carrellino rispetto alla prima fotocellula. Si stima, quindi, il tempo medio t_{1m} , la deviazione standard σ_1 , corrispondente all'errore da associare a tutti i tempi di passaggio, e si ricava l'intervallo 3σ .

Fase B:

Si posiziona la seconda fotocellula ad una distanza S dalla prima fotocellula (fissa) e si acquisiscono i tempi di passaggio t_1 e t_2 e di oscuramento t_{EA2} relativo alla seconda fotocellula.

Tale procedimento è ripetuto per 10 volte, aumentando progressivamente la distanza S di 50 mm.

Noto S e i tempi di passaggio dalle due fotocellule, t_1 e t_2 , si ricava la velocità media v_m dalla relazione:

$$v_m = \frac{(S - S_0)}{(t_2 - t_1)} = \frac{\Delta S}{\Delta t}$$

Noto lo spessore dx della bandierina e i tempi di oscuramento t_{EA1} e t_{EA2} , si ricava la velocità istantanea v_i :

$$v_i = \frac{dx}{dt}$$

Risultati sperimentali

In Tab. 1 e Tab. 2 sono riportati rispettivamente i dati sperimentali dei tempi di passaggio e di oscuramento del carrellino relativi alla prima fotocellula con le sensibilità delle stesse (10^{-4} s e 10^{-5} s).

Tab.1 Tempi di passaggio alla prima fotocellula			
n.	$t_1 \pm 10^{-4}(s)$	n.	$t_1 \pm 10^{-4}(s)$
1	0,9695	16	0,9687
2	0,9709	17	0,9880
3	0,9708	18	0,9882
4	0,9848	19	0,9893
5	0,9697	20	0,9698
6	0,9930	21	0,9837
7	0,9695	22	0,9853
8	0,9708	23	0,9861
9	0,9705	24	0,9872
10	0,9951	25	0,9721
11	0,9985	26	0,9881
12	0,9910	27	0,9713
13	0,9907	28	0,9715
14	0,9951	29	0,9708
15	0,9869	30	0,9756

Tab.2 Tempi di oscuramento della prima fotocellula			
n.	$t_{EA1} \pm 10^{-5}(s)$	n.	$t_{EA1} \pm 10^{-5}(s)$
1	0,01621	16	0,01624
2	0,01625	17	0,01625
3	0,01626	18	0,01624
4	0,01627	19	0,01623
5	0,01626	20	0,01626
6	0,01628	21	0,01628
7	0,01624	22	0,01629
8	0,01625	23	0,01634
9	0,01627	24	0,01626
10	0,01624	25	0,01629
11	0,01627	26	0,01628
12	0,01624	27	0,01631
13	0,01625	28	0,01630
14	0,01626	29	0,01632
15	0,01628	30	0,01630

In Tab. 3 sono riportati i dati del tempo di passaggio alla prima (t_1) e seconda (t_2) fotocellula e i tempi di oscuramento (t_{EA2}) della seconda fotocellula, al variare della distanza relativa tra i due sensori (ΔS).

Tab.3

Tempi t_1 , t_2 e t_{EA2} al variare della distanza tra le due fotocellule				
n.	$t_1 \pm 10^{-2}(s)$	$t_2 \pm 10^{-2}(s)$	$t_{EA2} \pm 10^{-5}(s)$	$\Delta S \pm 1 (mm)$
1	0,97	1,47	0,01510	250
2	0,97	1,63	0,01500	300
3	0,97	1,79	0,01492	350
4	0,97	1,94	0,01487	400
5	0,97	2,08	0,01478	450
6	0,97	2,25	0,01478	500
7	0,97	2,40	0,01461	550
8	0,97	2,55	0,01466	600
9	0,99	2,73	0,01474	650
10	0,97	2,84	0,01433	700

Analisi dati e risultati

Fase A

In Tab.4 sono riportati il valore medio del tempo di passaggio del carrellino davanti la prima fotocellula t_{1m} , la deviazione standard σ_1 , la deviazione standard della media σ_{1m} e il valore 3σ .

Tab. 4 Tempo di passaggio medio della prima fotocellula

Tempo medio t_{1m} (s)	Deviazione standard σ_1 (s)	Deviazione standard della media σ_{1m} (s)	3σ (s)
0,981	0,01	0,002	0,03

Il valore medio t_{1m} , la deviazione standard σ_1 e quella della media σ_{1m} sono stati stimati con le relazioni riportate in appendice A.

Il tempo medio di passaggio è $t_{1m} = (0,981 \pm 0,002)s$.

La deviazione standard σ_1 è l'incertezza che verrà applicata ad ogni misura del tempo di passaggio.

Una deviazione standard così alta è giustificata osservando la distribuzione degli scarti delle 30 misure di Tab.1.

In fig.1 si nota, infatti, che le misure ottenute si distribuiscono in due zone specifiche del grafico come se appartenessero a due famiglie di dati differenti. Non potendo affermare quale sia a priori la popolazione di dati "corretta" è necessario tenere conto del contributo di entrambe.

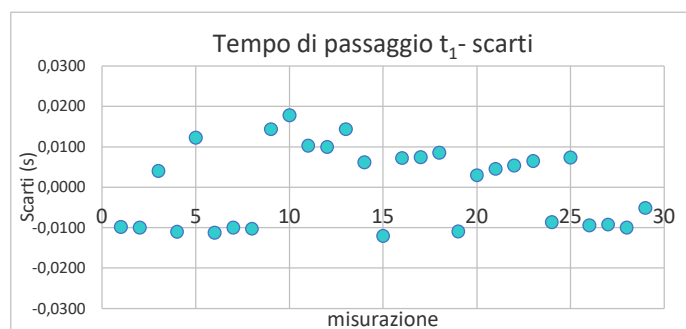


Fig.1: Grafico scarti tempi di passaggio t_1

L'intervallo $(t_{1m} \pm 3\sigma) = (0,98 \pm 0,03)s$ è stato utilizzato per accettare o meno le misure riportate in Tab.3. In questo caso nessuna misura è stata rigettata.

In Tab.5 sono riportati il valore medio del tempo di oscuramento del carrellino davanti la prima fotocellula t_{EA1m} , la deviazione standard σ_{EA1} e quella della media σ_{EA1m} , stimati attraverso le relazioni riportate in appendice A.

Tab. 5 **Tempo di oscuramento medio della prima fotocellula**

Tempo medio t_{EA1m} (s)	Deviazione standard σ_{EA1} (s)	Deviazione standard della media σ_{EA1m} (s)
0,01627	0,00003	0,00001

Fase B

- Velocità media

Dalla Tab.3 si ricavano le velocità medie riportate in Tab.6 con il loro errore, ottenuto attraverso la propagazione dell'errore per grandezze derivate:

$$\sigma_{vm} = \sqrt{\left(\frac{\partial v_m}{\partial \Delta S}\right)^2 \sigma_{\Delta S}^2 + \left(\frac{\partial v_m}{\partial \Delta t}\right)^2 \sigma_{\Delta t}^2} = \sqrt{\left(\frac{1}{\Delta t}\right)^2 \sigma_{\Delta S}^2 + \left(\frac{S}{(\Delta t)^2}\right)^2 \sigma_{\Delta t}^2}$$

Tab.6

			Stima delle velocità medie	
n.	$\Delta S \pm 0,001$ (m)	$\Delta t \pm 0,02$ (s)	$v_m = \Delta S / \Delta t$ (m/s)	Errore di propagazione σ_{vm} (m/s)
1	0,250	0,50	0,50	0,02
2	0,300	0,66	0,45	0,01
3	0,350	0,82	0,43	0,01
4	0,400	0,97	0,41	0,01
5	0,450	1,11	0,41	0,01
6	0,500	1,28	0,39	0,01
7	0,550	1,43	0,38	0,01
8	0,600	1,58	0,380	0,005
9	0,650	1,74	0,374	0,004
10	0,700	1,87	0,374	0,004

Si osservi che anche per la variazione di tempo Δt è stato propagato l'errore, considerando che nel caso della somma o della sottrazione di due misure, l'incertezza della misura finale è sempre data dalla somma delle singole incertezze.

Le incertezze su t_1 e t_2 erano $\sigma_1 = 0,01$ s, pertanto, l'incertezza su Δt vale 0,02 s.

La velocità media complessiva stimata dai valori in Tab.6 è: **$v_{1m} = (0,41 \pm 0,01)$ m/s.**

○ Metodo dei Minimi Quadrati (MMQ)

Confrontando gli errori relativi tra lo spazio S e il tempo Δt , è possibile trascurare l'incertezza su S (si veda Tab.7). Infatti, l'errore relativo del tempo è circa 10 volte maggiore dell'errore relativo sullo spazio. Si ricava, dunque, la retta di best-fit (Fig.2) tramite l'MMQ, ponendo sull'asse delle x lo spazio S e sull'asse delle y il tempo Δt .

Si osserva che in figura 2 non sono evidenti le bande di errore considerate su Δt , essendo molto piccole (0,02 s). Esse sono, invece, visibili in Fig. 3, in seguito ad uno zoom effettuato sul primo punto sperimentale.

Tramite l'MMQ si ipotizza che i dati sperimentali siano legati dalla seguente relazione lineare:

$$\Delta t = a + bS$$

Tab.7 Confronto tra errori relativi

$\Delta S/S$	$\Delta t/t$
0,004	0,04
0,003	0,03
0,003	0,02
0,003	0,02
0,002	0,02
0,002	0,02
0,002	0,01
0,002	0,01
0,002	0,01
0,001	0,01

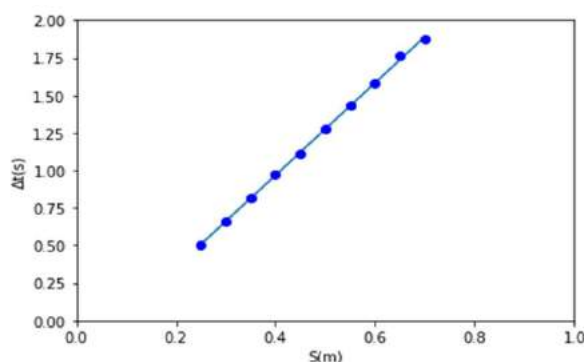


Fig.2: Retta di best fit
velocità media

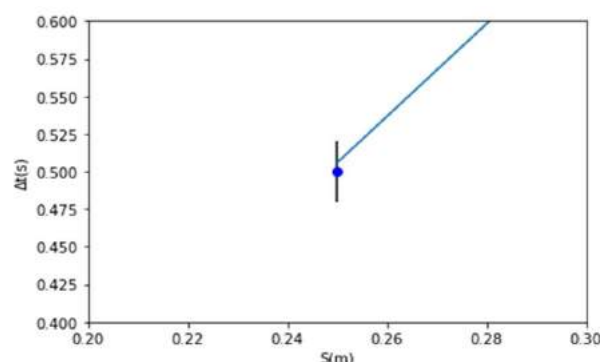


Fig.3: Zoom sul primo punto sperimentale di
Fig.2, dove sono visibili le barre di errore

I parametri a e b ottenuti dal fit sono:

- $a = (-0,26 \pm 0,02) \text{ s}$
- $b = (3,08 \pm 0,04) \text{ s/m}$

Il valore chi-quadro è:

- $\chi^2 = 3,02$

ottenuto con la seguente relazione:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^N \frac{(y_i - y_{i-st})^2}{\sigma_i^2}$$

Dove y_{i-st} rappresenta la stima, tramite la relazione funzionale ipotizzata, dei valori aspettati delle diverse variabili y_i , aventi deviazione standard σ_i .

Per verificare che la relazione lineare ottenuta descriva efficacemente le misure sperimentali acquisite, è necessario applicare il test χ^2 .

Test χ^2

Sia H_0 l'ipotesi che sussista una dipendenza lineare tra spazio S e tempo Δt e che i valori attesi y_{i-st} , ricavati dalla relazione funzionale ipotizzata, rispecchino adeguatamente quelli sperimentali y_i .

Scelto un livello di significatività $\alpha = 5\%$, considerando che il numero di misure è $N=10$ e il numero di parametri ricavati è $m=2$, i gradi di libertà sono $(N-m)=8$, il chi quadro critico è $\chi^2_{critico} = 15,5$.

Poiché $\chi^2 < \chi^2_{critico}$, l'ipotesi H_0 è accettata. Pertanto, il fit di Fig.2 rappresenta in maniera soddisfacente le misure.

Si noti che l'intercetta a ottenuta attraverso il fit assume un valore negativo. D'altro canto, ci si aspetta che la retta di best fit passi per l'origine e che, pertanto, il parametro a sia nullo. Si rende necessario, verificarne la compatibilità attraverso il test di Gauss.

Test di Gauss per l'intercetta

Sia H_0 l'ipotesi che l'intercetta a ricavata dalla retta dei minimi quadrati sia consistente con lo zero.

Scelto un livello di significatività $\alpha = 5\%$ e, dunque, $Z_{critico}$ assume valore $Z_{critico}=1,96$, poiché:

$$Z = \left| \frac{a_{fit} - a_{teorico}}{\sigma_a} \right| = \left| \frac{-0,26 - 0}{0,02} \right| = 13$$

$Z > Z_{critico}$, l' H_0 è rifiutata e, dunque, l'intercetta ottenuta attraverso l'MMQ non è consistente con il valore teorico. L' H_0 è rifiutata anche provando a scegliere un livello di significatività più basso $\alpha=1\%$, il cui $Z_{critico} = 2,58$.

La velocità media v_{2m} è l'inverso del coefficiente angolare b della retta di best fit.

$$v_{2m} = \frac{1}{b} = 0,3247 \text{ m/s}$$

L'errore da associare a v_{2m} è dato dalla seguente relazione di propagazione dell'errore:

$$\Delta v_{2m} = \frac{\Delta b}{b} v_{2m} = 0,004 \text{ m/s}$$

Pertanto, $v_{2m} = (0,325 \pm 0,004) \text{ m/s}$.

Per confrontare la velocità media complessiva v_{1m} e quella ricavata attraverso l'MMQ v_{2m} è necessario applicare il test di Gauss.

Test di Gauss per la velocità media

Sia H_0 l'ipotesi che il valore sperimentale della velocità media complessiva v_{1m} sia compatibile con il valore v_{2m} ottenuto attraverso la retta dei minimi quadrati.

Scelto un livello di significatività $\alpha = 5\%$ e, dunque, $Z_{critico}$ assume valore $Z_{critico}=1,96$, poiché:

$$Z = \left| \frac{v_{1m} - v_{2m}}{\sqrt{\sigma_{v_{1m}}^2 + \Delta_{v_{2m}}^2}} \right| = \left| \frac{0,41 - 0,325}{0,01} \right| = 7,89$$

$Z > Z_{\text{critico}}$, l'H0 è rifiutata e, dunque, i due valori v_{1m} e v_{2m} non sono consistenti.

L'H0 è rifiutata anche provando a scegliere un livello di significatività più basso $\alpha=1\%$, il cui $Z_{\text{critico}} = 2,58$.

- Velocità istantanea

Dalla Tab.3 si ricavano le velocità istantanee riportate in Tab.8 con il loro errore, ottenuto attraverso la propagazione dell'errore per grandezze derivate:

$$\sigma_{vi} = \sqrt{\left(\frac{\partial v_i}{\partial x}\right)^2 \sigma_x^2 + \left(\frac{\partial v_i}{\partial t_{EA2}}\right)^2 \sigma_{EA1}^2} = \sqrt{\left(\frac{1}{t_{EA2}}\right)^2 \sigma_x^2 + \left(\frac{x}{(t_{EA})^2}\right)^2 \sigma_{EA1}^2}$$

dove x è lo spessore della bandierina con l'incertezza σ_x , mentre t_{EA2} si riferisce al tempo di oscuramento della seconda fotocellula, a cui è stato associato l'errore σ_{EA1} riportato in Tab.5, ricavato mediante le 30 misure del tempo di oscuramento della prima fotocellula.

Tab.8 Velocità istantanee

$v_i = dx/dt$ (m/s)	Errore di propagazione σ_{vi} (m/s)
0,3212	0,0007
0,3233	0,0007
0,3251	0,0007
0,3262	0,0007
0,3281	0,0007
0,3281	0,0007
0,3320	0,0007
0,3308	0,0007
0,3290	0,0007
0,3385	0,0007

La velocità istantanea complessiva è $v_{i1} = (0,328 \pm 0,002) \text{ m/s}$.

○ Metodo dei Minimi Quadrati (MMQ)

In Fig.4 è raffigurata la retta di best fit, riportando sull'asse delle x il tempo $\Delta t = (t_2 - t_1)$ riferito ai valori di Tab.3 e sull'asse y le velocità istantanee v_i di Tab.8.

In questo caso non era possibile trascurare gli errori dei valori riportati sull'asse delle ascisse ed è stato, quindi, necessario considerare anche il contributo dell'errore

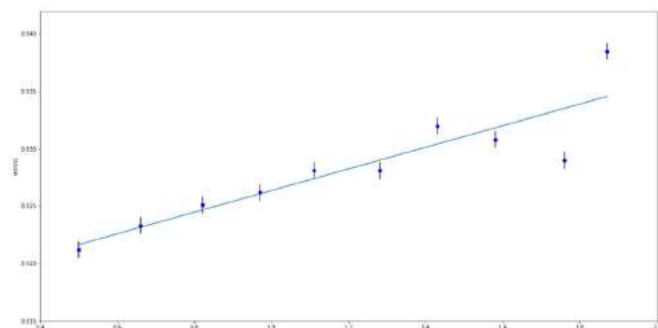


Fig.4: Retta di best fit velocità istantanea

sul tempo $\sigma_{\Delta t}$. L'errore, dunque, applicato ai valori riportati sull'asse y è stato ottenuto sommando in quadratura l'errore trasposto del tempo di passaggio $\sigma_{\Delta t}$ e σ_{vi} nel seguente modo:

$$\sigma_y = \sqrt{\Delta y^2 + \sigma_{vi}^2} = \sqrt{(b'\sigma_{\Delta t})^2 + \sigma_{vi}^2} = 0,0007$$

dove b' indica il coefficiente angolare del fit calcolato senza considerare il contributo dell'errore dei valori posti sull'asse x.

La retta dei minimi quadrati ha relazione:

$$v_i = a + b\Delta t$$

I valori dell'intercetta e del coefficiente angolare ricavati dal fit sono:

- **$a = (0.3168 \pm 0.0007) \text{ m/s}$**
- **$b = (0.0095 \pm 0.0005) \text{ m/s}^2$**

Il valore chi-quadro è:

- **$\chi^2 = 74,29$**

ottenuto con la seguente relazione:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^N \frac{(y_i - y_{i-st})^2}{\sigma_i^2}$$

Dove y_{i-st} rappresenta la stima, tramite la relazione funzionale ipotizzata, dei valori aspettati delle diverse variabili y_i , aventi deviazione standard σ_i .

Per verificare che la relazione lineare ottenuta descriva efficacemente le misure sperimentali acquisite, è necessario applicare il test χ^2 .

Test χ^2

Sia H_0 l'ipotesi che la relazione lineare supposta sia corretta e che, dunque, i valori teorici rispecchino adeguatamente quelli sperimentali.

Scelto un livello di significatività $\alpha = 5\%$, considerando che il numero di misure è $N=10$ e il numero di parametri ricavati è $m=2$, i gradi di libertà sono $(N-m)=8$, il chi quadro critico è **$\chi^2_{\text{critico}} = 15,5$** .

Poiché $\chi^2 > \chi^2_{\text{critico}}$ l'ipotesi H_0 è rigettata. Pertanto, il fit ipotizzato non rappresenta la distribuzione lineare attesa delle misure.

Tale risultato indica che l'errore considerato sulla variabile y sia stato probabilmente sottostimato.

Applico, dunque, sotto l'ipotesi che la relazione funzionale sia lineare, l'errore a posteriori $\sigma_y' = 0,002 \text{ m/s}$ e calcolo nuovamente i parametri di fit.

La retta ottenuta dal nuovo fit è rappresentata in Fig.5.

I valori dell'intercetta e del coefficiente angolare ricavati dal nuovo fit sono:

- **a = (0.317 ± 0.002) m/s**
- **b = (0.009 ± 0.001) m/s²**

La retta di best fit che si attendeva di ricavare attraverso l'MMQ era una retta orizzontale. Si rende, dunque, necessario applicare il Test di Gauss per verificare la consistenza tra il valore del coefficiente angolare b e lo zero.

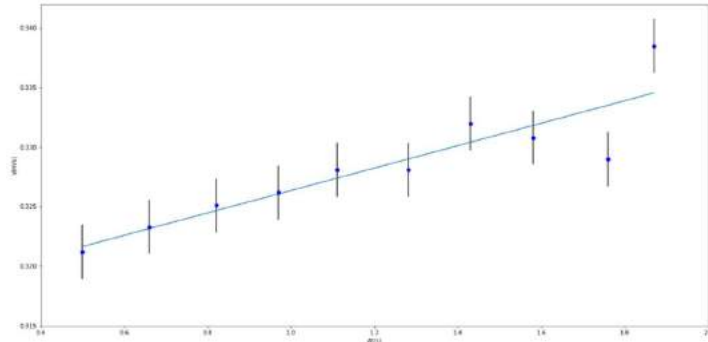


Fig.5: Retta di best fit velocità istantanea con errore a posteriori

Test di Gauss per il coefficiente angolare

Sia H0 l'ipotesi che il parametro di fit **b** ricavato dalla retta dei minimi quadrati sia consistente con lo zero.

Scelto un livello di significatività $\alpha = 5\%$ e, dunque, Z_{critico} assume valore $Z_{\text{critico}} = 1,96$, poiché:

$$Z = \left| \frac{b_{\text{fit}} - b_{\text{teorico}}}{\sigma_b} \right| = \left| \frac{0,009 - 0}{0,001} \right| = 9$$

$Z > Z_{\text{critico}}$ l'H0 è rifiutata e, dunque, il coefficiente angolare ottenuto attraverso l'MMQ non è consistente con il valore teorico.

L'H0 è rifiutata anche provando a scegliere un livello di significatività più basso $\alpha = 1\%$, il cui $Z_{\text{critico}} = 2,58$.

Si rende necessario, inoltre, applicare un altro test di Gauss per confrontare il valore dell'intercetta **a** con il valore della velocità media v_{2m} ottenuta in precedenza.

Test di Gauss per intercetta e velocità media

Sia H0 l'ipotesi che il parametro di fit **a** ricavato dalla retta dei minimi quadrati sia consistente con il valore della velocità media v_{2m} ricavata dal fit precedente.

Scelto un livello di significatività $\alpha = 5\%$ e, dunque, Z_{critico} assume valore $Z_{\text{critico}} = 1,96$, poiché:

$$Z = \left| \frac{a - v_{2m}}{\sqrt{\sigma_a^2 + \Delta_{v_{2m}}^2}} \right| = \left| \frac{0,317 - 0,325}{0,004} \right| = 1,78$$

$Z < Z_{\text{critico}}$ l'H0 è accettata e, dunque, l'intercetta ottenuta attraverso l'MMQ è consistente con il valore della velocità media.

Conclusioni

In questo studio viene verificata la validità della legge del moto rettilineo uniforme, attraverso l'impiego di una rotaia sulla quale un corpo era vincolato a scivolare su un cuscinetto di aria compressa, al fine di ridurre le forze di attrito. Attraverso l'ausilio di fotocellule applicate lungo la rotaia è stato possibile verificare che la velocità del carrellino si mantiene costante lungo tutto il percorso, confermando il moto in esame. Si è verificato, quindi, che lo spazio è una funzione lineare del tempo e che la velocità istantanea è compatibile con la velocità media.

A tal fine sono stati condotti i test del χ^2 e di Gauss. Il primo per verificare le relazioni lineari; il secondo per verificare la compatibilità tra il valore atteso e il valore ottenuto sperimentalmente.

Di seguito i risultati ottenuti:

- Velocità media

- Test del χ^2 : **L'H0 è accettata**, pertanto, la velocità media può essere descritta mediante una relazione lineare tra spazio e tempo;
- Test di Gauss: **L'H0 è rigettata**, la velocità media complessiva (sperimentale) e la velocità ricavata dal MMQ (teorica) non sono consistenti tra loro.

Possibili cause:

- o La presenza di eventuali errori sistematici crea un offset che "sposta" la retta di best fit dall'origine. Ciò spiega anche il valore negativo dell'intercetta **a** ricavata dal MMQ;
- o La Fig.1 mostra che gli scarti dei tempi di passaggio si concentrano in zone diverse del grafico. Essi sembrano appartenere a due famiglie differenti.
Nell'analisi ho deciso di non escludere alcuna misura. Tale scelta ha comportato una deviazione standard piuttosto alta rispetto alla sensibilità della fotocellula, tale da compromettere la riuscita del test di Gauss.

- Velocità istantanea

- Test del χ^2 : **L'H0 è rigettata**.

Possibili cause:

- o La sottostima dell'errore;
- o La presenza di alcuni punti che fluttuano in maniera anomala rispetto alla retta di best fit (si veda fig. 6). A conferma di ciò, provando a rigettare tali valori, il test del χ^2 viene superato.

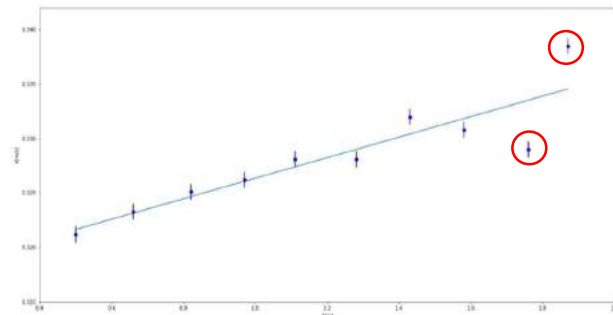


Fig.6: Punti che si discostano visivamente dalla retta di best fit

Nell'analisi dati si è seguita l'idea della

possibile sottostima dell'errore. Per questo motivo, i test di Gauss sono stati effettuati utilizzando i parametri di fit ricavati usando la stima dell'errore a posteriori σ_y' .

- Test di Gauss tra coefficiente angolare e zero: **L'H0 è rigettata**. La retta di best fit ottenuta non è orizzontale, ma possiede una pendenza. Ciò sembrerebbe indicare la presenza di una correlazione tra la velocità istantanea (posta sull'asse y) e il tempo di passaggio (posto

sull'asse x), sebbene tale nesso non dovrebbe esserci. A conferma di ciò il coefficiente di correlazione lineare $r=0,8986$ assume un valore molto vicino a 1, piuttosto che a 0.

Possibili cause:

- Difetto presente nell'apparato sperimentale. Probabilmente l'aria che fuoriusciva dai fori della rotaia non sempre è stata omogenea e questo si ripercuote sulla velocità del carrellino;
- Presenza di eventuali errori sistematici. Può darsi che una delle due fotocellule utilizzate per compiere l'esperimento abbia avuto dei malfunzionamenti dovuti, ad esempio, ad una cattiva calibrazione della stessa.
- Test di Gauss per confrontare intercetta **a** e velocità media: **L'H0 è accettata**. Vi è una compatibilità tra i due valori e ciò dimostra, dunque, che il moto analizzato è effettivamente un moto rettilineo uniforme.

Infine, occorre dire che l'attrezzatura sperimentale utilizzata per acquisire le misure è molto sensibile e l'eccessiva precisione con cui sono state rilevate potrebbe aver compromesso l'accuratezza delle stesse, provocando il fallimento dei test di compatibilità.

Appendice A – Formule

- Media: $\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$
- Deviazione standard: $\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}$
- Errore standard della media: $\sigma_s = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$