

# Relazione dell'esperimento di misura della velocità della luce

Lorenzo Ramella, Alessandro Matteo Rossi, Marco Tambini

January 6, 2021

## **Abstract**

L'esperimento si propone di misurare la velocità della luce usando il metodo di Focault.

## **Contents**

# 1 Introduzione teorica

Il metodo di Foucault per la misura della velocità della luce consiste nell'uso di uno specchio rotante, che riflette la luce emessa da una sorgente su di uno specchio concavo.

Una sorgente luminosa  $S$  emette una luce che, opportunamente diaframmata da una lente  $L_1$ , attraversa una lastra semitrasparente angolata di  $45^\circ$  rispetto alla direzione del fascio. Una lente  $L_2$  focalizza il fascio nel punto  $S'$  sullo specchio concavo, dopo essere stata deflessa dallo specchio rotante. La luce riflessa dallo specchio concavo viene deflessa nuovamente dallo specchio rotante, che nel frattempo ha ruotato di un angolo

$$\alpha = \omega \frac{2D}{c} \quad (1)$$

dove  $\omega$  è la velocità angolare dello specchio e  $D$  è la distanza tra lo specchio rotante e lo specchio concavo.

Il fascio luminoso di ritorno sulla lente  $L_2$  viene focalizzato come se provenisse da una sorgente  $S''$  spostata da  $S'$  di una quantità

$$\Delta = 2\alpha D \quad (2)$$

Tenendo presente che il fattore di amplificazione  $G$  della lente  $L_2$  è esprimibile mediante la seguente relazione:

$$G = \frac{b}{D + a} \quad (3)$$

dove  $b$  è la distanza tra  $L_2$  e la sorgente luminosa e  $a$  la distanza tra  $L_2$  e lo specchio rotante. Lo spostamento laterale  $\delta$  dell'immagine si ottiene quindi combinando le equazioni (??) e (??)

$$\delta = G\Delta = \frac{2\alpha b D}{D + a} = \frac{4D^2 b \omega}{c(D + a)} \quad (4)$$

È possibile ricavare  $b$  dalla legge dei punti coniugati. Sapendo che:

$$\frac{1}{b} + \frac{1}{D + a} = \frac{1}{f_2} \quad (5)$$

Si deduce che:

$$b = \frac{f_2(D + a)}{D + a - f_2} \quad (6)$$

E quindi, conoscendo l'espressione di  $\delta$  dalla equazione (??), in cui compare  $c$ , e avendo ricavato l'unica variabile incognita  $b$  dall'equazione (??), si ottiene:

$$c = \frac{4f_2 D^2 (\omega - \omega_0)}{[(D + a + f_2)\Delta\delta]} \quad (7)$$

dove  $\omega_0$  è la velocità angolare iniziale e  $\Delta\delta = \omega - \omega_0$  è lo spostamento dell'immagine della sorgente luminosa.

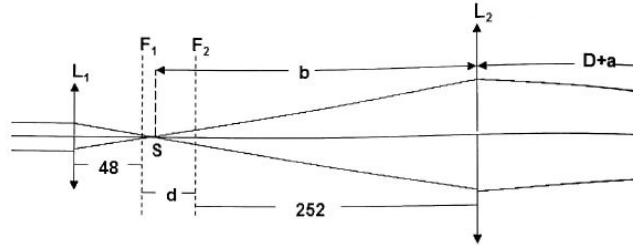


Figure 1: Schema apparato - interno del beam-splitter

## 2 Progettazione dell'esperimento

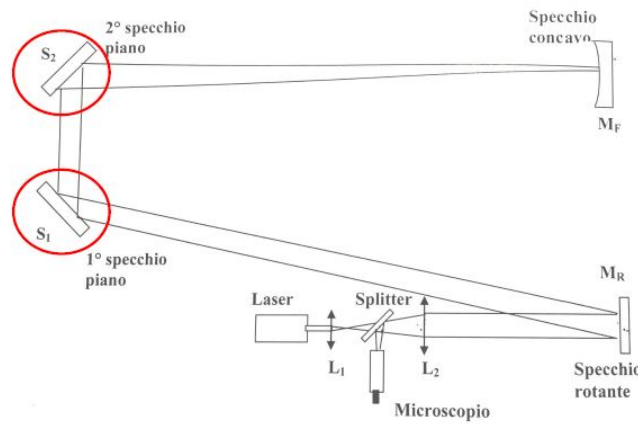


Figure 2: Schema dell'apparato di laboratorio

Il banco ottico di laboratorio era composto da una sorgente luminosa e un sistema di lenti e specchi, il tutto ancorato saldamente alle varie parti del banco mediante morse.

Prima di cominciare le misure di  $c$  è necessario assicurarsi che gli elementi del banco ottico siano correttamente posizionati.

Per fare ciò principio abbiamo misurato la lunghezza del cammino ottico  $D$  del raggio luminoso dallo specchio rotante allo specchio concavo. Per fare ciò abbiamo raccolto 4 misure per le distanze tra specchio rotante e specchio 1  $d_{rot,1}$ , tra specchio 1 e specchio 2  $d_{1,2}$  e tra specchio 2 e specchio concavo  $d_{2,conc}$ , per poi ottenere tramite una somma delle loro medie aritmetiche (con incertezza  $\sigma d = \sigma D = 0,01m$ ) il valore di  $D$ . Gli strumenti utilizzati in questa fase sono stati due rotelle metriche di portata 15m e 3m.

Come mostrato in Figura ??, la sorgente luminosa coerente è un laser A CHE COSA?? fissato magneticamente a un binario graduato. Per evitare danni agli occhi abbiamo adoperato una coppia di lamine polaroid, con base magnetica, poste sul binario subito dopo il laser. è necessario porre una prima lente  $L_1$  70mm, seguendo la scala graduata con la sensibilità del millimetro, per poter fare convergere la luce proveniente "dall'infinito" della lente dichiara essere a una distanza  $f_1 = 0,048m$ . A una distanza di 180mm dall'inizio della scala graduata è posto il beam-splitter, un elemento dotato di uno specchio semiriflettente orientabile rispetto alla luce incidente, che permette di trasmettere la luce in arrivo alla lente  $L_2$ , se angolato di  $45^\circ$ . La lente

$L_2$ , con focale dichiarata dal produttore di  $f_2 = 0,252m$ , è posta a distanza  $b = ???$  dal beam-splitter e trasmette a sua volta la luce allo specchio rotante. Questo sistema di lenti serve per ottenere un'onda piana, e questo è possibile poichè la somma delle focali di  $L_1$  ed  $L_2$  è maggiore della loro distanza. Il beam-splitter è uno strumento dotato di uno specchio

Per permettere alla luce di percorrere il sistema di specchi che va dallo specchio rotante, allo specchio  $S'$ , quindi allo specchio  $S''$  e infine allo specchio concavo bisogna inizialmente accertarsi, posizionando una squadretta forata con base magnetica sul binario, che la luce incida sul centro dello specchio rotante. Contemporaneamente bisogna agire sulla cinghia dello specchio rotante per permettere al raggio incidente di raggiungere la parte riflettente dello specchio e quindi subire una riflessione verso il centro (approssimativamente) di  $S'$ . Fatto questo si regola l'inclinazione di  $S'$  per riflettere il raggio proveniente dallo specchio rotante approssimativamente nel centro di  $S''$ , attraverso due viti micrometriche poste dietro lo specchio. Si ripete quest'ultimo procedimento per portare il raggio dal centro di  $S''$  al centro dello specchio concavo.

Specifichiamo che a causa della complessità della misura della focale di una lente le focali e le posizioni corrette per lenti e beam-splitter vengono fornite dai docenti, e le consideriamo affette da un'incertezza sistematica trascurabile.

Raggiunta la condizione di raggio che percorre tutta la lunghezza  $D$ , è necessario agire nuovamente sulle viti micrometriche degli specchi per fare tornare il raggio luminoso indietro fino al beam-splitter ripercorrendo il suo cammino di andata. Può essere in questa fase utile utilizzare un foglio di carta millimetrata da posizionare a mezz'aria dove si pensa che i raggi passino, per verificare spostandolo sempre più verso lo "specchio di destinazione" che i raggi coincidano e che il puntino luminoso del raggio di andata non si discosti da quello del raggio di ritorno.

In ultimo si è provveduto a regolare la messa a fuoco del microscopio, dopo averlo inserito nel foro sulla parte superiore del beam-splitter, fissandolo a una data altezza all'interno del foro per mezzo di una vite. Il microscopio è utile per osservare il raggio di "ritorno" del laser, poichè in questo secondo passaggio per lo specchio, angolato di  $45^\circ$ , il raggio urta la parte riflettente dello specchio e viene deviato verso il cannocchiale del beam-splitter, permettendone l'osservazione. È possibile leggere la posizione di questo punto riflesso agendo su una vite micrometrica posta sul beam-splitter, che permette di centrare il puntino luminoso con un crocifilo, garantendo una precisione di  $\sigma = 10\mu m$ .

#### Problemi tecnici riscontrati:

Sebbene sia abbastanza agevole misurare le distanze tra specchi, posizionare le lenti e il beam-splitter è fondamentale già da questa prima fase prestare la massima attenzione a non toccare il banco di lavoro (singolare, sebbene  $S'$  e  $S''$  fossero posti su un secondo tavolo, il che rendeva utile misurare alcune distanze con la rotella di portata  $15m$ ). Questo potrebbe compromettere gravemente la taratura del banco.

È invece complicato e dispendioso a livello di tempo correggere la posizione degli specchi. Infatti mentre uno dei due sperimentatori lavorava sulle viti micrometriche, l'altro aveva il compito di tracciare il percorso del raggio o osservandone la posizione sulle pareti (se e quando possibile) o aiutandosi con la carta millimetrata quando esso era prossimo a raggiungere il centro dello specchio.

Il compito certamente più arduo è fare ritornare il raggio di ritorno su quello di andata, poichè la carta millimetrata è l'unico strumento valido. Durante il suo utilizzo il rischio di coprire il raggio di andata (facendo scomparire quello di ritorno) nel tentativo di vederli entrambi sul bordo del foglio è alto.

## 3 Misure

### 3.1 Raccolta dati

L'esperienza è stata svolta da Rossi in collaborazione con Tambini e Ramella in collaborazione con ??????. Si è deciso di analizzare i due set di misure, fino al calcolo della miglior stima della velocità della luce  $c_{best}$ , separatamente. Questo a causa di differenze:

1. Sulla misura di  $D$  poichè sono stati usati due apparati dello stesso modello ma fisicamente differenti, e quindi si sono presentate differenze.
2. Sul motore dello specchio rotante utilizzato. Il gruppo Rossi-Tambini ha utilizzato un motore per lo specchio rotante che permetteva solo la regolazione in senso orario e antiorario con una frequenza di rotazione di  $\nu = 1500Hz$  e  $\nu = 750Hz$ . Mentre il motore del gruppo Ramella-??? permetteva una rotazione oraria e antioraria con frequenza variabile fino a circa i  $1500Hz$ .

### 3.2 Analisi dati - Misure Rossi e Tambini

L'apparato utilizzato da Rossi e Tambini era provvisto di motorino con frequenza di rotazione non regolabile con continuità, ma solo a  $\nu = 750Hz$  e  $\nu = 1500Hz$  in senso orario e antiorario. Dopo avere raccolto i dati relativi alla lunghezza del cammino ottico abbiamo adoperato il foglio di calcolo per ricavarne un valore pari a  $D = 13,60 \pm 0,01m$  (Sezione ?? - Figura ??).

Si specifica che durante la trattazione di questo insieme di misure si indicheranno nel testo e nelle tabelle le rotazioni in senso orario con segno positivo, mentre quelle antiorarie con segno negativo. Questo non inficia i calcoli di quantità ricavate in maniera indiretta poichè le frequenze di rotazione sono state trattate in modulo.

Siccome l'equazione ?? è risolubile inserendo dei valori di partenza  $\omega_0$  e  $\delta_0$  e dei valori finali  $\omega$  e  $\delta$ , abbiamo proceduto raccogliendo coppie di misure, rispettivamente per valori iniziali e finali, per poi calcolare da ogni coppia un valore della velocità della luce  $c$ . I dati raccolti sono riportati in Sezione ?? - Figura ?? . Il valore  $\delta_0$  è stato misurato mettendo lo specchio in rotazione a una certa  $\nu$ , dopo avere aspettato che l'immagine del laser riflessa visibile nel microscopio del beam-splitter si fermasse in un punto. Infatti con l'utilizzo della vite micrometrica abbiamo centrato il puntino luminoso e ne abbiamo letto la posizione. Analogamente è stato fatto per il valore  $\delta$ : abbiamo impostato il motorino su una diversa velocità, osservato lo spostamento del puntino e ne abbiamo misurato la posizione.

Segnaliamo che durante l'esperienza in laboratorio abbiamo accidentalmente urtato per due volte il beam-splitter. è infatti possibile notare, osservando i dati raccolti (Sezione ?? - Figura ??), come i valori di  $\delta_0$  e  $\delta$  raccolti per uguali frequenze di rotazione presentino valori molto differenti tra loro durante le varie misure.

Abbiamo deciso di analizzare e quantificare gli effetti di questi urti. Abbiamo ipotizzato che non fosse possibile non avere alcun effetto provocato da queste compromissioni dell'apparato di misura. Inoltre abbiamo supposto che la misura 38 della Figura ?? fosse stata pesantemente affetta da un errore causato da questi urti, poichè riportava un surreale valore della velocità della luce pari a  $c_{38} \approx 4,788 \cdot 10^8 \pm 2,0 \cdot 10^6 m/s$ , con un errore molto maggiore rispetto a tutte le altre misure, come si vedrà nei paragrafi successivi.

Pertanto abbiamo suddiviso i valori  $\delta_0$  e  $\delta$  raccolti in base alla frequenza di rotazione a cui sono stati raccolti ( $\nu = -750Hz$ ,  $\nu = 750Hz$ ,  $\nu = -1500Hz$ ,  $\nu = 1500Hz$ ) e ne abbiamo fatto un grafico, come riportato in nelle Figure (??), (??), (??), (??), (??). Già da un primo confronto qualitativo, osservando i grafici, era possibile osservare come le misure di  $\delta_0$  e  $\delta$  fossero divise in

tre insiemi. Un'analisi quantitativa fatta applicando una distribuzione normale a ogni insieme per ogni  $\nu$  (Figura (??)) mostra come questi tre insiemi siano altamente incompatibili (probabilità inferiore a 1%), con  $z \gtrsim 3$ . Ne è risultato che il confine tra questi gruppi di misure sono proprio quei dati raccolti prima e dopo l'urto contro il beam splitter, ovvero le misure 22 e 38.

Nonostante questi urti, le misure risultano essere coerenti con il valore vero della velocità della luce  $c_{vero} \approx 2,998 \cdot 10^8 m/s$ , eccezion fatta per la misura 38. In questo specifico caso l'urto è avvenuto tra le due misure e infatti il valore stimato della velocità della luce per questa misura risulta essere  $c_{38} = 4,788 \cdot 10^8 \pm 2,0 \cdot 10^6 m/s$ . Abbiamo deciso di procedere al rigetto di questa misura, verificando che  $c_{38}$  distansse  $6,28\sigma$  dal valore medio delle misure.

Specifichiamo che la media di queste misure, di quelle di Ramella e , e dei due set di dati uniti sono state fatte tramite una media aritmetica. Per l'errore abbiamo voluto tenere conto non solo della discrepanza tra le singole misure, calcolando la loro deviazione standard, ma anche di un eventuale errore sistematico aggiungendo tramite somma in quadratura il maggiore degli errori presenti sulle misure, e pertanto è stato ottenuto come

$$\sigma c_{best} = \delta \quad (8)$$

### 3.3 Analisi dati - Misure Ramella e ???

L'apparato utilizzato da Ramella e ??? era invece dotato di motorino con frequenza di rotazione regolabile con continuità. Dopo avere raccolto i dati relativi alla lunghezza del cammino ottico abbiamo adoperato il foglio di calcolo per ricavarne un valore pari a  $D = 13,60 \pm 0,01m$  (?? - Figura ??).

Si precisa che durante la trattazione di questo insieme di misure verranno indicate nel testo e nelle tabelle le rotazioni dello specchio in senso orario (clockwise) come *CW* e in senso antiorario (counterclockwise) come *CCW*.

La prima misura di  $c$  effettuata è stata per rotazioni in senso orario. Siccome l'equazione ?? è risolubile inserendo dei valori di partenza  $\omega_0$  e  $\delta_0$  e dei valori finali  $\omega$  e  $\delta$ , abbiamo raccolto i suddetti valori di partenza per poi, facendo ruotare lo specchio in senso orario con diverse frequenze, raccogliere un totale di 22 misure. Per i dati raccolti si faccia riferimento a . Siccome abbiamo la miglior stima della velocità della luce  $c_{best}$  unendo

## 4 Calcolo $c_{BEST}$

## 5 Conclusioni

## 6 Appendice

### 6.1 Grafici e Tabelle - Rossi e Tambini

MISURA DI D						
$od [m] = 0,01$						
	Misura 1	Misura 2	Misura 3	Misura 4	Media [m]	$od_{medio} [m]$
$d_{2,conc} [m]$	6,48	6,47	6,48	6,47	6,48	0,01
$d_{1,2} [m]$	0,60	0,59	0,59	0,59	0,59	0,01
$d_{rot,1} [m]$	6,27	6,26	6,27	6,27	6,27	0,01
					D [m]	13,34
					$\sigma D [m]$	0,01

Figure 3: Misura del cammino ottico  $D$

DATI RACCOLTI												
Misura	$\nu_o [Hz]$	$\omega_o [rad/s]$	$\delta_o [mm]$	$\delta_o [m]$	$\nu_i [Hz]$	$\omega_i [rad/s]$	$\delta_i [mm]$	$\delta_i [m]$	$\Delta\delta [m] =  \delta_o - \delta_i $	$c [m/s]$	$ac [m/s]$	Note
1	750	4712,39	10,04	0,01004	-750	-4712,39	9,62	0,00962	0,00042	2,964E+08	1,2E+06	
2	750	4712,39	10,04	0,01004	-1500	-9424,78	9,42	0,00942	0,00062	3,012E+08	1,2E+06	
3	750	4712,39	10,03	0,01003	1500	9424,78	10,25	0,01025	0,00022	2,829E+08	1,2E+06	
4	750	4712,39	10,03	0,01003	-750	-4712,39	9,62	0,00962	0,00041	3,036E+08	1,2E+06	
5	-1500	-9424,78	9,40	0,00940	750	4712,39	10,04	0,01004	0,00064	2,918E+08	1,2E+06	
6	-1500	-9424,78	9,45	0,00945	750	4712,39	10,05	0,01005	0,00060	3,112E+08	1,3E+06	
7	1500	9424,78	10,25	0,01025	-750	-4712,39	9,63	0,00963	0,00062	3,012E+08	1,2E+06	
8	-1500	-9424,78	9,40	0,00940	1500	9424,78	10,25	0,01025	0,00085	2,929E+08	1,2E+06	
9	1500	9424,78	10,27	0,01027	-1500	-9424,78	9,42	0,00942	0,00085	2,929E+08	1,2E+06	
10	-1500	-9424,78	9,40	0,00940	-750	-4712,39	9,61	0,00961	0,00021	2,964E+08	1,2E+06	
11	-1500	-9424,78	9,40	0,00940	750	4712,39	10,03	0,01003	0,00063	2,964E+08	1,2E+06	
12	-1500	-9424,78	9,40	0,00940	1500	9424,78	10,25	0,01025	0,00085	2,929E+08	1,2E+06	
13	-750	-4712,39	9,62	0,00962	-1500	-9424,78	9,41	0,00941	0,00021	2,964E+08	1,2E+06	
14	-750	-4712,39	9,62	0,00962	750	4712,39	10,03	0,01003	0,00041	3,036E+08	1,2E+06	
15	-750	-4712,39	9,61	0,00961	1500	9424,78	10,26	0,01026	0,00065	2,873E+08	1,2E+06	
16	750	4712,39	10,04	0,01004	-1500	-9424,78	9,40	0,00940	0,00064	2,918E+08	1,2E+06	
17	750	4712,39	10,04	0,01004	-750	-4712,39	9,63	0,00963	0,00041	3,036E+08	1,2E+06	
18	750	4712,39	10,05	0,01005	1500	9424,78	10,25	0,01025	0,00020	3,112E+08	1,3E+06	
19	1500	9424,78	10,26	0,01026	-1500	-9424,78	9,40	0,00940	0,00086	2,895E+08	1,2E+06	
20	1500	9424,78	10,26	0,01026	-750	-4712,39	9,63	0,00963	0,00063	2,964E+08	1,2E+06	
21	1500	9424,78	10,25	0,01025	750	4712,39	10,04	0,01004	0,00021	2,964E+08	1,2E+06	
22	-1500	-9424,78	9,57	0,00957	-750	-4712,39	9,77	0,00977	0,00020	3,112E+08	1,3E+06	Colpita la leva del beam-splitter prima di questa misura
23	-1500	-9424,78	9,57	0,00957	750	4712,39	10,20	0,01020	0,00063	2,964E+08	1,2E+06	
24	-1500	-9424,78	9,57	0,00957	1500	9424,78	10,41	0,01041	0,00084	2,964E+08	1,2E+06	
25	-750	-4712,39	9,77	0,00977	-1500	-9424,78	9,57	0,00957	0,00020	3,112E+08	1,3E+06	
26	-750	-4712,39	9,77	0,00977	750	4712,39	10,21	0,01021	0,00044	2,829E+08	1,2E+06	
27	-750	-4712,39	9,78	0,00978	1500	9424,78	10,43	0,01043	0,00065	2,873E+08	1,2E+06	
28	750	4712,39	10,22	0,01022	-1500	-9424,78	9,57	0,00957	0,00065	2,873E+08	1,2E+06	
29	750	4712,39	10,20	0,01020	-750	-4712,39	9,77	0,00977	0,00043	2,895E+08	1,2E+06	
30	750	4712,39	10,18	0,01018	1500	9424,78	10,37	0,01037	0,00019	3,276E+08	1,3E+06	
31	1500	9424,78	10,36	0,01036	-1500	-9424,78	9,53	0,00953	0,00083	3,000E+08	1,2E+06	
32	1500	9424,78	10,34	0,01034	-750	-4712,39	9,75	0,00975	0,00059	3,165E+08	1,3E+06	
33	1500	9424,78	10,35	0,01035	750	4712,39	10,15	0,01015	0,00020	3,112E+08	1,3E+06	
34	-1500	-9424,78	9,56	0,00956	-750	-4712,39	9,76	0,00976	0,00020	3,112E+08	1,3E+06	
35	-1500	-9424,78	9,55	0,00955	750	4712,39	10,19	0,01019	0,00064	2,918E+08	1,2E+06	
36	-1500	-9424,78	9,56	0,00956	1500	9424,78	10,39	0,01039	0,00083	3,000E+08	1,2E+06	
37	-750	-4712,39	9,71	0,00971	-1500	-9424,78	9,52	0,00952	0,00019	3,276E+08	1,3E+06	Colpito il beam splitter tra le due misure della coppia
38	-750	-4712,39	9,72	0,00972	750	4712,39	9,98	0,00998	0,00026	4,788E+08	2,0E+06	
39	-750	-4712,39	9,59	0,00959	1500	9424,78	10,21	0,01021	0,00062	3,012E+08	1,2E+06	
40	750	4712,39	10,00	0,01000	-1500	-9424,78	9,37	0,00937	0,00063	2,964E+08	1,2E+06	
41	750	4712,39	9,99	0,00999	-750	-4712,39	9,57	0,00957	0,00042	2,964E+08	1,2E+06	
42	750	4712,39	9,99	0,00999	1500	9424,78	10,21	0,01021	0,00022	2,829E+08	1,2E+06	
43	1500	9424,78	10,21	0,01021	-1500	-9424,78	9,36	0,00936	0,00085	2,929E+08	1,2E+06	
44	1500	9424,78	10,21	0,01021	-750	-4712,39	9,58	0,00958	0,00063	2,964E+08	1,2E+06	
45	1500	9424,78	10,21	0,01021	750	4712,39	9,99	0,00999	0,00022	2,829E+08	1,2E+06	
46	-1500	-9424,78	9,36	0,00936	1500	9424,78	10,21	0,01021	0,00085	2,929E+08	1,2E+06	
47	-1500	-9424,78	9,37	0,00937	1500	9424,78	10,20	0,01020	0,00083	3,000E+08	1,2E+06	

Figure 4: Dati Raccolti da Rossi-Tambini. I valori di  $\delta$  e  $\delta_0$  misurati per una stessa frequenza di rotazione sono evidenziati col medesimo colore.

CONFRONTO $\delta$ [mm] per $\nu$ [Hz] = 750		CONFRONTO $\delta$ [mm] per $\nu$ [Hz] = 1500		CONFRONTO $\delta$ [mm] per $\nu$ [Hz] = -750		CONFRONTO $\delta$ [mm] per $\nu$ [Hz] = -1500	
Misura	$\delta$ [mm]	Misura	$\delta$ [mm]	Misura	$\delta$ [mm]	Misura	$\delta$ [mm]
1a	10,04	3b	10,25	1b	9,62	2b	9,42
2a	10,04	7a	10,25	4b	9,62	5a	9,40
3a	10,03	8b	10,25	7b	9,63	6a	9,45
4a	10,03	9a	10,27	10b	9,61	8a	9,40
5b	10,04	12b	10,25	13a	9,62	9b	9,42
6b	10,05	15b	10,26	14a	9,62	10a	9,40
11b	10,03	18b	10,25	15a	9,61	11a	9,40
14b	10,03	19a	10,26	17b	9,63	12a	9,40
16a	10,04	20a	10,26	20b	9,63	13b	9,41
17a	10,04	21a	10,25	22b	9,77	16b	9,40
18a	10,05	24b	10,41	25a	9,77	19b	9,40
21b	10,04	27b	10,43	26a	9,77	22a	9,57
23b	10,20	30b	10,37	27a	9,78	23a	9,57
26b	10,21	31a	10,36	29b	9,77	24a	9,57
28a	10,22	32a	10,34	32b	9,75	25b	9,57
29a	10,20	33a	10,35	34b	9,76	28b	9,57
30a	10,18	36b	10,39	37a	9,71	31b	9,53
33b	10,15	39b	10,21	38a	9,72	34a	9,56
35b	10,19	42b	10,21	39a	9,59	35a	9,55
38b	9,98	43a	10,21	41b	9,57	36a	9,56
40a	10,00	44a	10,21	44b	9,58	37b	9,52
41a	9,99	45a	10,21			40b	9,37
42a	9,99	46b	10,21			43b	9,36
45b	9,99	47b	10,20			46a	9,36
						47a	9,37

(a) Misure raccolte per  $\nu = 750Hz$

(b) Misure raccolte per  $\nu = 1500Hz$

(c) Misure raccolte per  $\nu = -750Hz$

(d) Misure raccolte per  $\nu = -1500Hz$

Figure 5: Dati raccolti in tabelle secondo la  $\nu$  dello specchio rotante



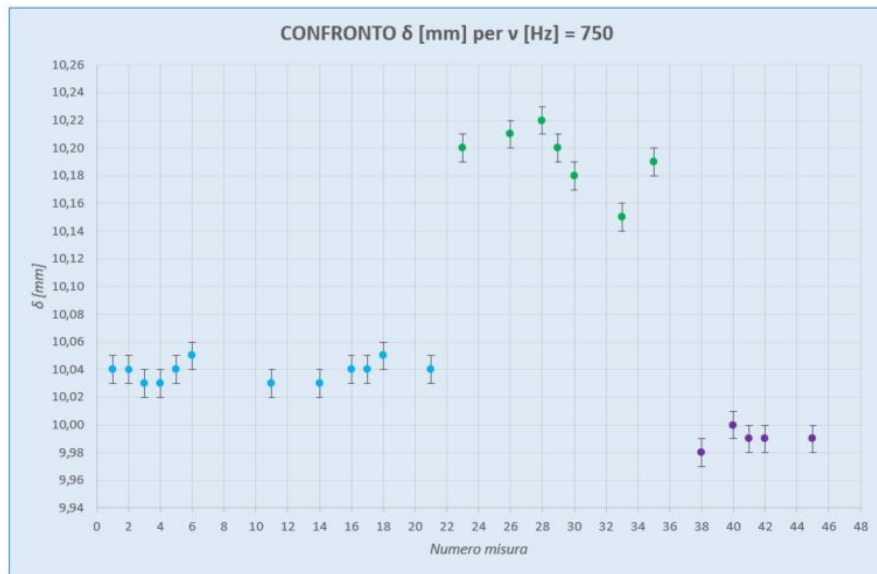


Figure 6: Grafico relativo a Figura (????)

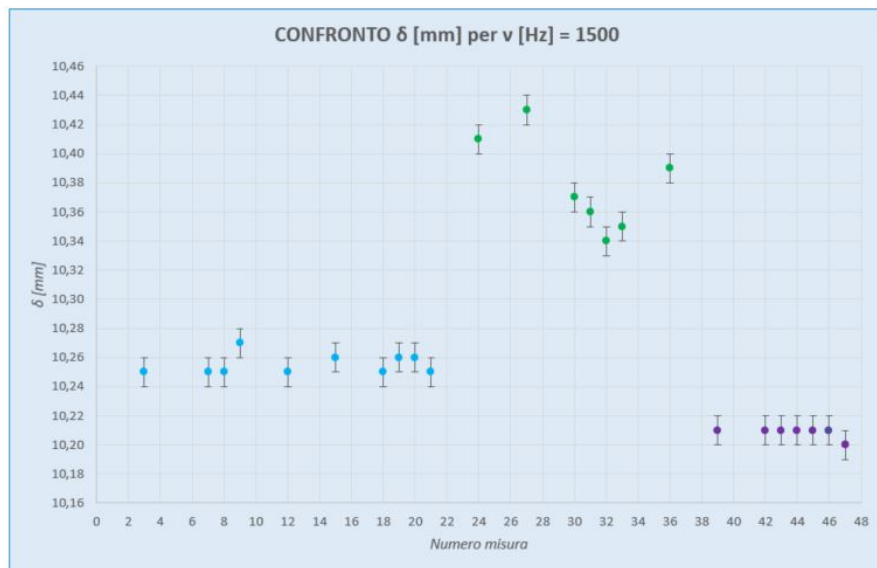


Figure 7: Grafico relativo a Figura (????)

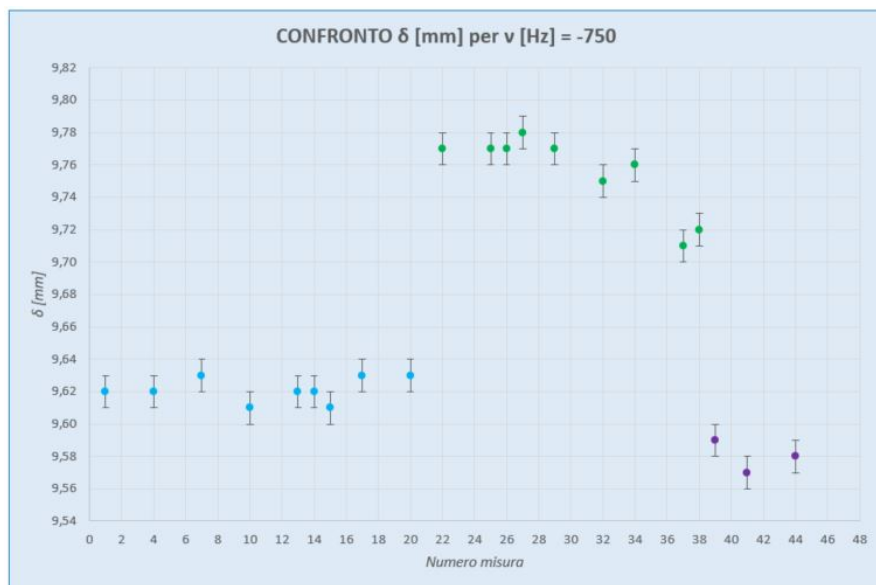


Figure 8: Grafico relativo a Figura (????)

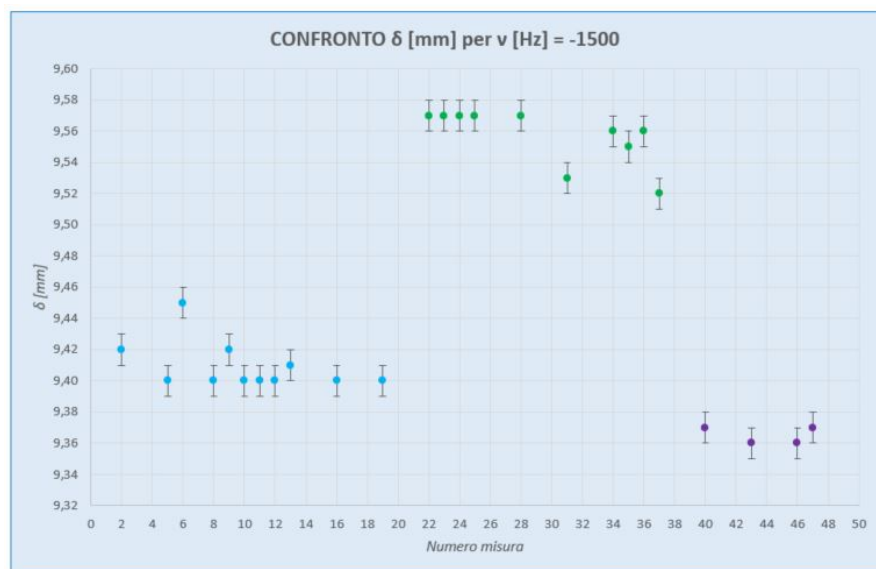


Figure 9: Grafico relativo a Figura (????)

Gaussiana - v = 750 Hz - serie 1 (blu)		Discrepanza - v = 750 Hz - serie 2 (verde)		Discrepanza - v = 750 Hz - serie 3 (viola)	
$\delta_{avg,1}$ [mm]	$\sigma_{avg,1}$ [mm]	$\delta_{avg,2}$ [mm]	$\sigma_{avg,2}$ [mm]	$\delta_{avg,3}$ [mm]	$\sigma_{avg,3}$ [mm]
10,04	0,01	10,19	0,02	9,99	0,01
COMPATIBILITA' TRA SERIE - v = 750 Hz					
$z_{1,2}$	Probabilità 1,2	$z_{1,3}$	Probabilità 1,3	$z_{2,3}$	Probabilità 2,3
6,94	<<1%	5,18	<<1%	9,17	<<1%

(a) Distribuzione normale relativa a Figura (????)

Gaussiana - v = 1500 Hz - serie 1 (blu)		Discrepanza - v = 1500 Hz - serie 2 (verde)		Discrepanza - v = 1500 Hz - serie 3 (viola)	
$\delta_{avg,1}$ [mm]	$\sigma_{avg,1}$ [mm]	$\delta_{avg,2}$ [mm]	$\sigma_{avg,2}$ [mm]	$\delta_{avg,3}$ [mm]	$\sigma_{avg,3}$ [mm]
10,26	0,01	10,38	0,03	10,209	0,003
COMPATIBILITA' TRA SERIE - v = 1500 Hz					
$z_{1,2}$	Probabilità 1,2	$z_{1,3}$	Probabilità 1,3	$z_{2,3}$	Probabilità 2,3
3,96	<<1%	6,14	<<1%	5,55	<<1%

(b) Distribuzione normale relativa a Figura (????)

Gaussiana - v = -750 Hz - serie 1 (blu)		Discrepanza - v = -750 Hz - serie 2 (verde)		Discrepanza - v = -750 Hz - serie 3 (viola)	
$\delta_{avg,1}$ [mm]	$\sigma_{avg,1}$ [mm]	$\delta_{avg,2}$ [mm]	$\sigma_{avg,2}$ [mm]	$\delta_{avg,3}$ [mm]	$\sigma_{avg,3}$ [mm]
9,62	0,01	9,76	0,02	9,58	0,01
COMPATIBILITA' TRA SERIE - v = -750 Hz					
$z_{1,2}$	Probabilità 1,2	$z_{1,3}$	Probabilità 1,3	$z_{2,3}$	Probabilità 2,3
5,53	<<1%	3,74	<<1%	7,15	<<1%

(c) Distribuzione normale relativa a Figura (????)

Gaussiana - v = -1500 Hz - serie 1 (blu)		Discrepanza - v = -1500 Hz - serie 2 (verde)		Discrepanza - v = -1500 Hz - serie 3 (viola)	
$\delta_{avg,1}$ [mm]	$\sigma_{avg,1}$ [mm]	$\delta_{avg,2}$ [mm]	$\sigma_{avg,2}$ [mm]	$\delta_{avg,3}$ [mm]	$\sigma_{avg,3}$ [mm]
9,41	0,02	9,56	0,02	9,365	0,005
COMPATIBILITA' TRA SERIE - v = -1500 Hz					
$z_{1,2}$	Probabilità 1,2	$z_{1,3}$	Probabilità 1,3	$z_{2,3}$	Probabilità 2,3
6,44	<<1%	2,78	0,54%	10,63	<<1%

(d) Distribuzione normale relativa a Figura (????)

Figure 10: Distribuzioni normali relative a Figura (??)

## 6.2 Grafici e Tabelle - Ramella e ???

MISURA DI D						
$\sigma d [m] = 0,01$						
	Misura 1	Misura 2	Misura 3	Misura 4	Media [m]	$\sigma$ Media [m]
$d_{2,conc} [m]$	6,74	6,73	6,74	6,73	6,735	0,005
$d_{1,2} [m]$	0,65	0,66	0,66	0,66	0,658	0,005
$d_{rot,1} [m]$	6,21	6,21	6,21	6,21	6,210	0,005
					D [m]	13,60
					$\sigma D [m]$	0,01

Figure 11: Misura del cammino ottico  $D$