

Litografia

Margherita Bini, Francesco Sacco

1 La litografia soffice come superamento della fotolitografia

La fotolitografia è un processo che permette il trasferimento di un pattern da una maschera a un resist, un composto polimerico, che copre la superficie di un semiconduttore, sfruttando la caratteristica del resist di cambiare la propria solubilità se esposto alla luce. Il pattern viene successivamente trasferito sul semiconduttore con un processo di incisione.

Questa tecnica ha delle problematiche legate al fatto che la massima risoluzione spaziale del pattern è fornita dalla lunghezza d'onda della radiazione utilizzata. Diminuire la lunghezza d'onda della sorgente crea problemi legati alla reperibilità di materiali, per la maschera, che siano trasparenti a quelle lunghezze d'onda e che quindi riescano a trasferire il disegno efficacemente sul resist. Inoltre, la fotolitografia richiede una superficie di lavoro piana.

La litografia soffice, che è la tecnica utilizzata in questo esperimento, si pone come obiettivo il superamento di queste problematiche. Si tratta di una tecnica che non utilizza più l'interazione radiazione materia ma le proprietà di materiali amorfi.

In questa esperienza è stata fatta una replica elastomerica (Sez. 3) di un pattern su silicio. La replica è stata utilizzata per fare una litografia di seconda generazione su un diverso polimero (Sez. 4) e sono stati confrontati i due pattern tra di loro.

In Sez. 5 è stata utilizzata la replica elastomerica di un canale per misurare il movimento di un fluido all'interno di esso.

2 Calibrazione del microscopio

Nell'esperienza è stato utilizzato un miscroscopio ottico con diverse lenti (ingrandimento $\times 4, \times 10, \times 20, \times 40$). Nel pattern su silicio sono presenti diverse forme geometriche. Al fine di misurare le dimensioni di alcune di esse è stato necessario calibrare il microscopio.

Ci è stato fornito un righello micrometrico da osservare al microscopio e sono stati eseguiti degli screenshot del righello con i diversi ingrandimenti (Fig. 1).

La distanza tra le tacchette del righello (un periodo) sul master è $d = 100 \mu\text{m}$. Per riuscire a determinare la corrispondente distanza per i diversi ingrandimenti è stata determinata la distanza di una porzione del righello in pixel, tracciando i segmenti in rosso come mostrato in Fig. 1. Per ogni misura abbiamo determinato la lunghezza massima e minima e abbiamo considerato la media come valore centrale e la semidispersione come errore (Tab. 1).

È stato contato il numero di tacchette contenute nella porzione di righello considerata ed è quindi stata determinata la lunghezza in μm .

	L max [pixel]	L min [pixel]	L [pixel]	L [μm]
4x, 45 tacchette	2005	1990	1998 ± 8	4400
10x, 18 tacchette	1935	1892	1910 ± 20	1700
20x, 10 tacchette	1994	1907	1950 ± 40	900
40x, 5 tacchette	1863	1753	1810 ± 60	400

Tabella 1: Misura della lunghezza di porzioni del righello per diversi ingrandimenti.

Per determinare il fattore di conversione abbiamo diviso la distanza in μm per la distanza in pixel, se indichiamo “l'unità di misura” del pixel con p abbiamo che il fattore di conversione $\text{pixel} \rightarrow \mu\text{m}$ è una grandezza che ha come unità di misura $\mu\text{m}/p$.

In Tab. 2 è riportato il fattore di conversione per i diversi ingrandimenti.

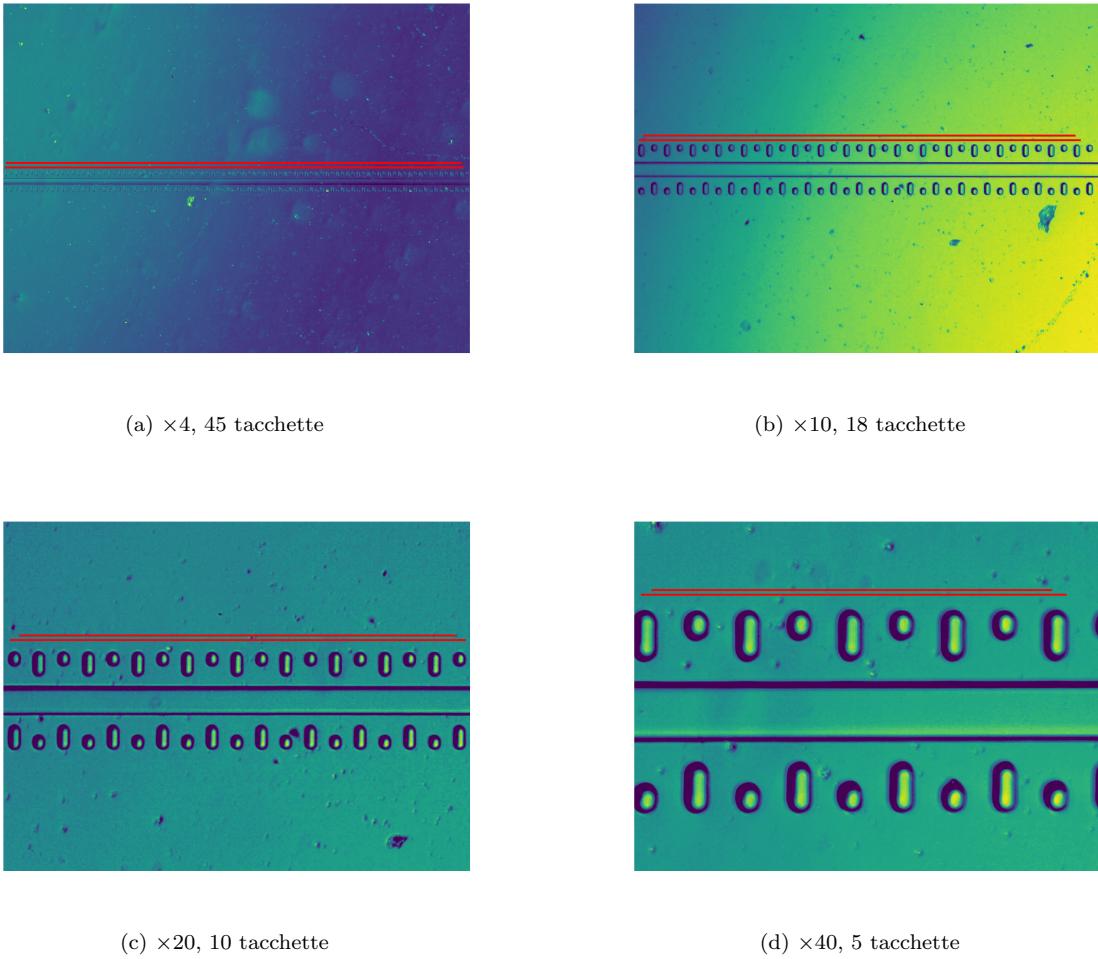


Figura 1: Foto del righello a diversi ingrandimenti

Ingrandimento	Fattore di conversione [$\mu\text{m/p}$]
4x	2.203 ± 0.008
10x	0.89 ± 0.01
20x	0.46 ± 0.01
40x	0.221 ± 0.007

Tabella 2: Fattore di conversione per i diversi ingrandimenti.

3 Replica molding

La prima parte dell’esperienza consiste nel creare la replica di un pattern che si trova sul silicio con il polidimetilsilossano (PDMS).

Il polimero PDMS è costituito dalla sequenza di monomeri formati da un gruppo Si-O abbinata a due gruppi metilici CH_3 .

Per caratterizzare l’elasticità del materiale è utile definire il Modulo di Young Y . Dato un cilindro del materiale in esame di lunghezza a riposo L , sezione A, a cui viene applicato una forza F , il Modulo di Young è determinato da: $Y = \frac{F}{\frac{\Delta L}{L}}$, ovvero è la forza applicata per unità di superficie sull’allungamento (accorciamento) percentuale.

Il PDMS ha modulo di Young basso, $\leq 10 \text{ MPa}$, è quindi molto elastico, fondamentale per fare contatto uniforme con il pattern su silicio.

Per facilitare la polimerizzazione del PDMS abbiamo aggiunto alla base elastomerica un catalizzatore in rapporto 9:1 e li abbiamo mescolati per qualche minuto. Abbiamo lasciato riposare il composto per far uscire le bolle d’aria che si sono formate, e abbiamo quindi messo la miscela sopra il campione in silicio in modo che

ne prendesse la forma.

Infine, per polimerizzarlo, lo abbiamo posto su una piastra a 140 °C - 150 °C per 15 minuti.

Dopo il tempo prestabilito abbiamo verificato che il processo di polimerizzazione fosse terminato toccando il PDMS con delle pinzette e l'abbiamo tolto dalla piastra.

Sono stati tagliati i bordi della replica con un bisturi ed è stata staccata attraverso l'uso di una pinzetta. Abbiamo quindi poggiato la superficie con il disegno su un vetrino da microscopio precedentemente pulito con dell'alcol.

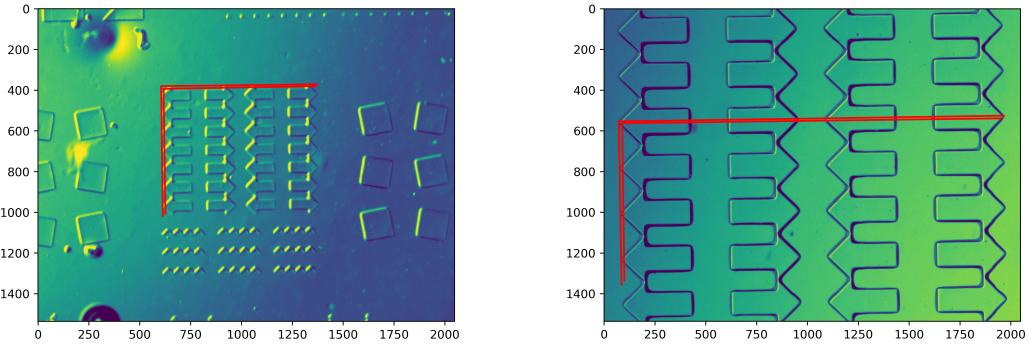
Sono state scelte delle lunghezze da misurare selezionando uno degli ingrandimenti del microscopio per ottenere una misura ottimale.

Per eseguire la misura sono stati effettuati degli screenshot del microscopio, abbiamo quindi tracciato i segmenti in rosso della lunghezza da misurare (Fig. 2, 3 e 4). Per ogni lunghezza è stata misurata una lunghezza massima e una minima, l'errore è stato valutato con la semidispersione e la conversione da pixel a μm è stata eseguita tramite i fattori di Tab. 2. Per scegliere gli estremi abbiamo utilizzato i cursori.

I risultati della misura sono riportati in Tab. 3, 4 e 5.

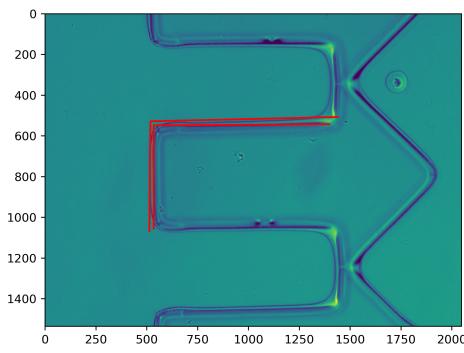
	L max [pixel]	L min [pixel]	L con errore [pixel]	L con errore [μm]
4x, verticale	6.38×10^2	6.13×10^2	$(6.3 \pm 0.1) \times 10^2$	$(1.41 \pm 0.03) \times 10^3$
4x, orizzontale	7.67×10^2	7.47×10^2	$(7.6 \pm 0.1) \times 10^2$	$(1.71 \pm 0.02) \times 10^3$
10x, verticale	8.03×10^2	7.72×10^2	$(7.9 \pm 0.2) \times 10^2$	$(7.4 \pm 0.1) \times 10^2$
10x, orizzontale	1.89×10^3	1.86×10^3	$(1.88 \pm 0.01) \times 10^3$	$(1.77 \pm 0.01) \times 10^3$
40x, verticale	5.40×10^2	5.07×10^2	$(5.2 \pm 0.2) \times 10^2$	$(1.45 \pm 0.05) \times 10^2$
40x, orizzontale	9.21×10^2	8.63×10^2	$(8.9 \pm 0.3) \times 10^2$	$(2.47 \pm 0.08) \times 10^2$

Tabella 3: Misura della lunghezza di alcuni lati delle frecce.



(a) $\times 4$, misura della lunghezza dei lati del rettangolo

(b) $\times 10$, misura della lunghezza di un lato del rettangolo e di metà lato.



(c) $\times 40$, misura della lunghezza di alcuni lati della freccia.

Figura 2: Misure della lunghezza di alcuni lati delle frecce.

	L max [pixel]	L min [pixel]	L con errore [pixel]	L con errore [μm]
10x, verticale	1.16×10^3	1.15×10^3	$(1.154 \pm 0.008) \times 10^3$	$(1.03 \pm 0.02) \times 10^3$
10x, orizzontale	1.22×10^3	1.20×10^3	$(1.214 \pm 0.010) \times 10^3$	$(1.08 \pm 0.02) \times 10^3$
20x, verticale	5.19×10^2	4.84×10^2	$(5.0 \pm 0.2) \times 10^2$	$(2.3 \pm 0.1) \times 10^2$
20x, orizzontale	4.23×10^2	3.94×10^2	$(4.1 \pm 0.1) \times 10^2$	$(1.9 \pm 0.1) \times 10^2$
40x, verticale	2.01×10^2	1.56×10^2	$(1.8 \pm 0.2) \times 10^2$	$(3.9 \pm 0.6) \times 10^1$
40x, orizzontale	1.93×10^2	1.55×10^2	$(1.7 \pm 0.2) \times 10^2$	$(3.8 \pm 0.5) \times 10^1$

Tabella 4: Misura della lunghezza di alcuni lati delle frecce.

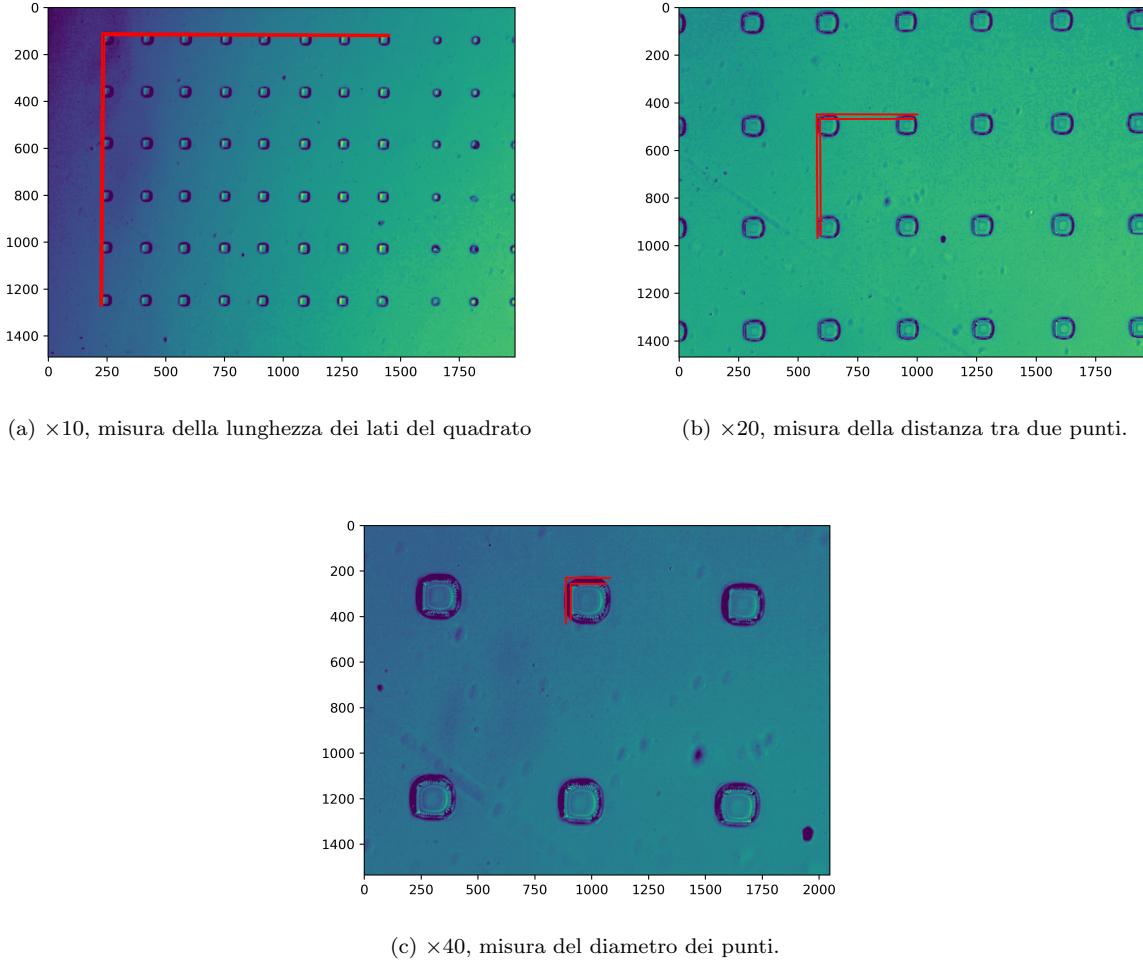


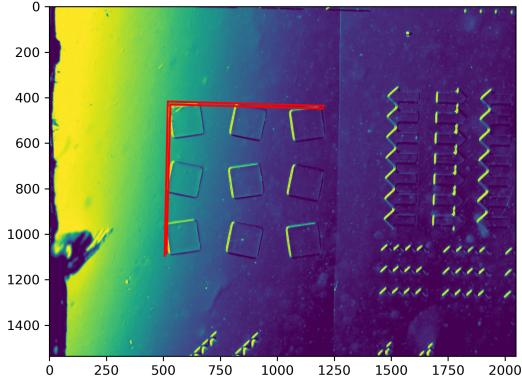
Figura 3: Misure di alcune lunghezze nella figura con i punti.

	L max [pixel]	L min [pixel]	L con errore [pixel]	L con errore [μm]
4x, verticale	6.78×10^2	6.54×10^2	$(6.7 \pm 0.1) \times 10^2$	$(1.47 \pm 0.03) \times 10^3$
4x, orizzontale	6.85×10^2	6.69×10^2	$(6.77 \pm 0.08) \times 10^2$	$(1.49 \pm 0.02) \times 10^3$
10x, verticale	1.04×10^3	1.03×10^3	$(1.034 \pm 0.006) \times 10^3$	$(9.2 \pm 0.2) \times 10^2$
10x, orizzontale	1.04×10^3	1.02×10^3	$(1.032 \pm 0.009) \times 10^3$	$(9.2 \pm 0.2) \times 10^2$
20x, verticale	6.70×10^2	6.44×10^2	$(6.6 \pm 0.1) \times 10^2$	$(3.0 \pm 0.1) \times 10^2$
20x, orizzontale	6.77×10^2	6.31×10^2	$(6.5 \pm 0.2) \times 10^2$	$(3.0 \pm 0.2) \times 10^2$

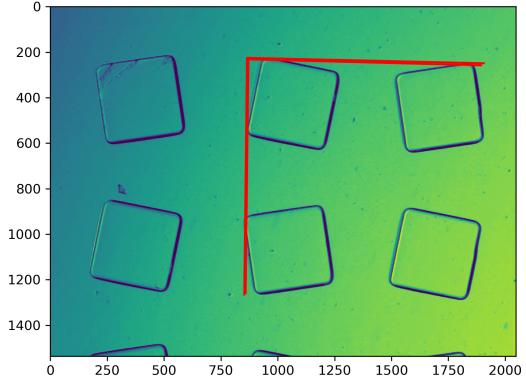
Tabella 5: Misura della lunghezza di alcuni lati dei quadrati

4 Soft molding

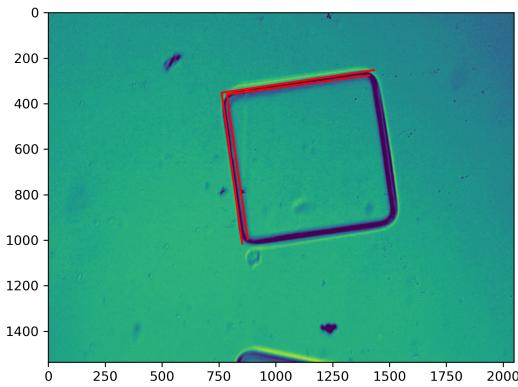
Il Polimetilmetacrilato (PMMA) è un polimero termoplastico. Si tratta di una sostanza simile al vetro che a temperatura ambiente risulta solida. Il PMMA, se riscaldato, va in transizione vetrosa diminuendo la sua viscosità.



(a) $\times 4$, misura della lunghezza della figura con i quadrati



(b) $\times 10$, misura della lunghezza della figura con i quadrati.



(c) $\times 20$, misura dei lati del quadrato.

Figura 4: Misure di alcune lunghezze nella figura con i quadrati.

Al fine di fare una replica del pattern in silicio del master in PMMA è stato prima fatta una replica in PDMS (Sez. 3) per poi fare una replica della replica col PMMA.

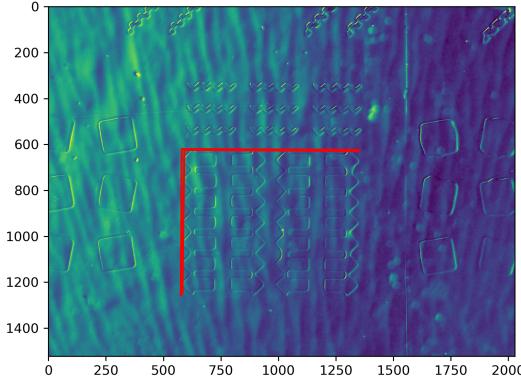
Per fare ciò abbiamo fatto aderire il PDMS al PMMA, processo che avviene grazie alle forze di Van der Walls, sono stati quindi posizionati su una piastra a 120°C per circa 10 minuti: la viscosità del PMMA diminuisce e esso fluisce per capillarità spontanea all'interno del pattern dell'elastomero.

Abbiamo quindi aspettato che l'oggetto si raffreddasse, staccato la replica elastomerica di PDMS, che rimane inerte dato che la sua temperatura di transizione vetrosa è maggiore di quella del PMMA, e osservato al microscopio il PMMA (Fig. 5 e 6) ripetendo le misure fatte anche sul PDMS (Tab. 6 e 7).

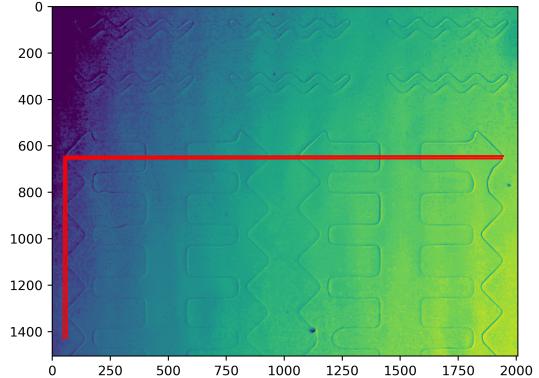
Nella procedura sono state riscontrate difficoltà nel fare aderire il PDMS al PMMA, a causa dei bordi leggermente rovinati del PDMS. Per questa ragione prima di posizionare la replica elastomerica sul PMMA abbiamo tagliato nuovamente le estremità con il bisturi.

	L max [pixel]	L min [pixel]	L con errore [pixel]	L con errore [μm]
4x, verticale	6.36×10^2	6.24×10^2	$(6.30 \pm 0.06) \times 10^2$	$(1.39 \pm 0.02) \times 10^3$
4x, orizzontale	7.72×10^2	7.55×10^2	$(7.64 \pm 0.08) \times 10^2$	$(1.68 \pm 0.03) \times 10^3$
10x, verticale	7.86×10^2	7.70×10^2	$(7.78 \pm 0.08) \times 10^2$	$(6.9 \pm 0.1) \times 10^2$
10x, orizzontale	1.89×10^3	1.88×10^3	$(1.885 \pm 0.007) \times 10^3$	$(1.67 \pm 0.03) \times 10^3$
40x, verticale	5.20×10^2	4.70×10^2	$(5.0 \pm 0.2) \times 10^2$	$(1.10 \pm 0.09) \times 10^2$
40x, orizzontale	9.17×10^2	6.80×10^2	$(8 \pm 1) \times 10^2$	$(1.8 \pm 0.3) \times 10^2$

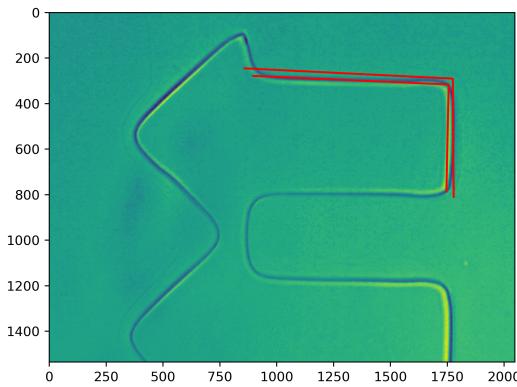
Tabella 6: Misura della lunghezza di alcuni lati delle frecce su PMMA.



(a) $\times 4$, misura della lunghezza dei lati del rettangolo contenente il disegno con le frecce



(b) $\times 10$, misura della lunghezza dei lati del rettangolo contenente il disegno con le frecce



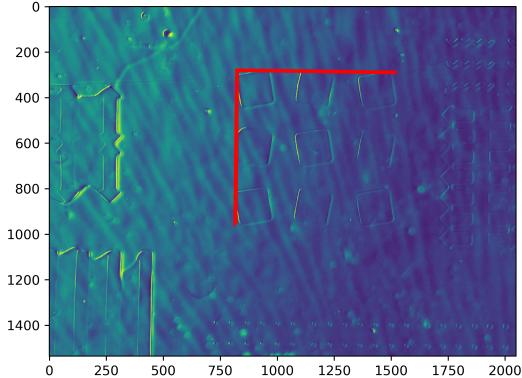
(c) $\times 40$, misura della lunghezza di alcuni lati della freccia.

Figura 5: Misura della lunghezza di alcuni lati delle frecce su PMMA.

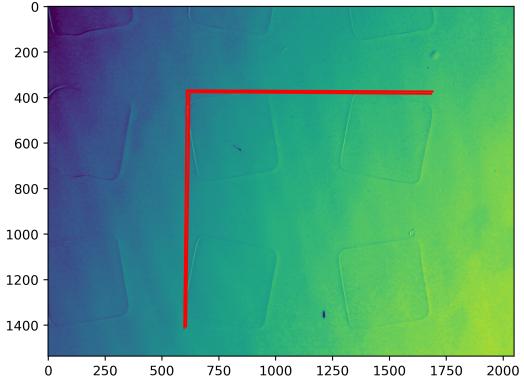
	L max [pixel]	L min [pixel]	L con errore [pixel]	L con errore [μm]
4x, verticale	6.85×10^2	6.69×10^2	$(6.77 \pm 0.08) \times 10^2$	$(1.49 \pm 0.02) \times 10^3$
4x, orizzontale	7.04×10^2	6.87×10^2	$(6.96 \pm 0.08) \times 10^2$	$(1.53 \pm 0.02) \times 10^3$
10x, verticale	1.04×10^3	1.03×10^3	$(1.036 \pm 0.007) \times 10^3$	$(9.2 \pm 0.2) \times 10^2$
10x, orizzontale	1.08×10^3	1.06×10^3	$(1.072 \pm 0.010) \times 10^3$	$(9.5 \pm 0.2) \times 10^2$
20x, verticale	6.90×10^2	6.52×10^2	$(6.7 \pm 0.2) \times 10^2$	$(3.1 \pm 0.2) \times 10^2$
20x, orizzontale	6.93×10^2	6.42×10^2	$(6.7 \pm 0.3) \times 10^2$	$(3.1 \pm 0.2) \times 10^2$

Tabella 7: Misura della lunghezza di alcuni lati dei quadrati

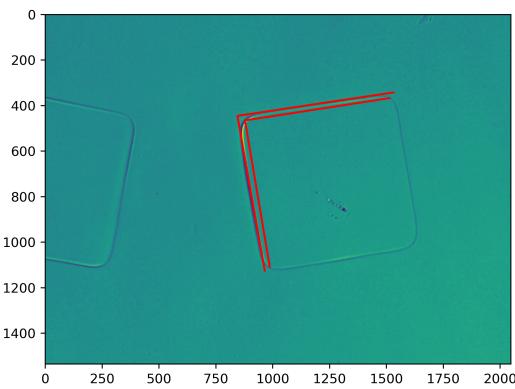
Confrontando le misure ottenute con il PMMA e quelle con PDMS (Tab. 3 e 6, Tab. 5 e 7) per le stesse lunghezze con lo stesso ingrandimento vediamo come non tutte siano compatibili entro l'intervallo di incertezza. Questo può essere dovuto ad una sottostima dell'errore nelle lunghezze su PMMA. Infatti, mentre l'errore sulle misure su PDMS è dovuto allo spessore dei disegni stessi, su PMMA lo spessore delle linee è notevolmente diminuito a causa del non completo trasferimento del disegno, ma sono presenti effetti di deformazione che sono più difficili da includere nell'errore. L'errore cresce notevolmente infatti per la misura su PMMA con ingrandimento 40x, dato che, come si nota da Fig. 5-(c) la deformazione è più evidente e quindi più facilmente misurabile.



(a) $\times 4$, misura della lunghezza della figura con i quadrati



(b) $\times 10$, misura della lunghezza della figura con i quadrati.



(c) $\times 20$, misura dei lati del quadrato.

Figura 6: Misure di alcune lunghezze nella figura con i quadrati su PMMA.

5 Capillarità

Nella terza fase dell’esperienza è stato utilizzato un master con un canale, con un righello a fianco, di cui è stata fatta la replica elastomerica su PDMS.

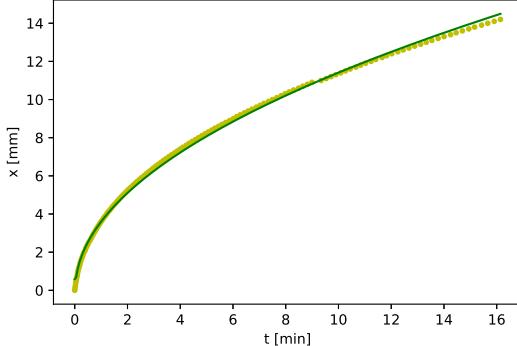
Posizionando la replica su un vetrino è stato osservato il canale al miscroscopio per individuare e localizzare alcuni difetti, come piccole bolle o deformazioni del canale stesso.

Abbiamo quindi immesso, tramite una pipetta, dall’estremo che ritenevamo più opportuno, una goccia di un liquido. La goccia di liquido riesce a percorrere il canale per capillarità spontanea. Abbiamo quindi misurato il tempo che il liquido impiegava per passare tra due tacche adiacenti del rigello. Conoscendo la distanza delle tacchette del righello ($100 \mu\text{m}$) è stato possibile determinare la distanza percorsa dal liquido in funzione del tempo.

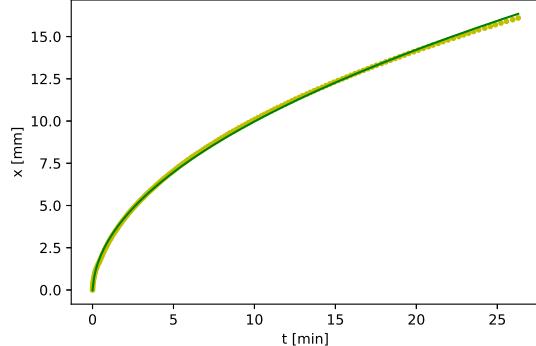
Per i primi tre campionamenti abbiamo utilizzato l’ingrandimento 10x del miscroscopio ed è stato eseguito un fit (Fig. 7) con la funzione, data x la coordinata lungo il canale e prendendo $t=0$ il momento in cui il fluido entra nel canale: $x(t) = A\sqrt{t}$. A è un parametro che dipende dalla:

- grandezza della sezione del canale: se il canale è più largo la goccia entra più facilmente al suo interno;
- viscosità: se la viscosità del liquido è minore esso entra più velocemente all’interno del canale;
- temperatura: provoca un abbassamento della viscosità del liquido e quindi un riempimento del canale più veloce.

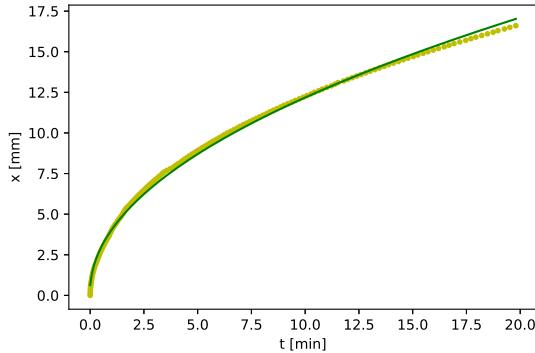
Abbiamo eseguito tre misurazioni differenti, su canali diversi. Il tempo è stato misurato attraverso un programma sul computer in grado di registrare i tempi parziali ogni volta che il liquido passava per una tacca del righello.



(a) $A = 3.608 \pm 0.006 \text{ mm}/\sqrt{\text{min}}$



(b) $A = 3.160 \pm 0.004 \text{ mm}/\sqrt{\text{min}}$



(c) $A = 3.860 \pm 0.008 \text{ mm}/\sqrt{\text{min}}$

Figura 7: Distanza percorsa in funzione del tempo del liquido all'interno del canale e parametro A ottenuto dal fit.

Notiamo come il valore di A fluttui al di fuori del margine d'errore tra un fit e l'altro. I motivi, in ordine di plausibilità, possono essere i seguenti:

- I punti sperimentalni contati più di una volta o non contati affatto;
- La sezione cambia tra un canale e l'altro o lungo il canale stesso;
- Il tempo di durata dell'acquisizione
- La dimensione della goccia del liquido immessa diversa nelle diverse misurazioni;
- Imperfezioni del canale (bolle, polvere, ecc...).

Tuttavia per noi è difficile dire quali di questi motivi abbiano prodotto una fluttuazione del parametro e quali invece siano trascurabili.

Un modo per eliminare l'errore del conteggio dei punti sperimentalni è di non contarli affatto. È stato fatto un filmato dello schermo del microscopio dal momento in cui la goccia viene inserita nel canale in modo tale da fare una misura dei pixel percorsi dal liquido.

Il microscopio non aveva la funzione di registrare il video di quello che si vedeva a schermo, abbiamo quindi filmato lo schermo del microscopio con un cellulare fissato su un treppiedi, assicurandoci che l'obiettivo fosse il più ortogonale possibile allo schermo per minimizzare l'errore di parallasse.

Ogni singolo fotogramma del video registrato risultava come in Fig. 8. Per diminuire i tempi di calcolo è stata tagliata la parte dell'immagine che non comprendeva il canalino e l'immagine è stata convertita in bianco e nero. Al fine di localizzare il punto dove è arrivato il liquido occorre considerare due fotogrammi successivi tra di loro e farne la "differenza" ottenendo un'immagine come quella in Fig. 9.



Figura 8: Fotogramma numero 600 del video

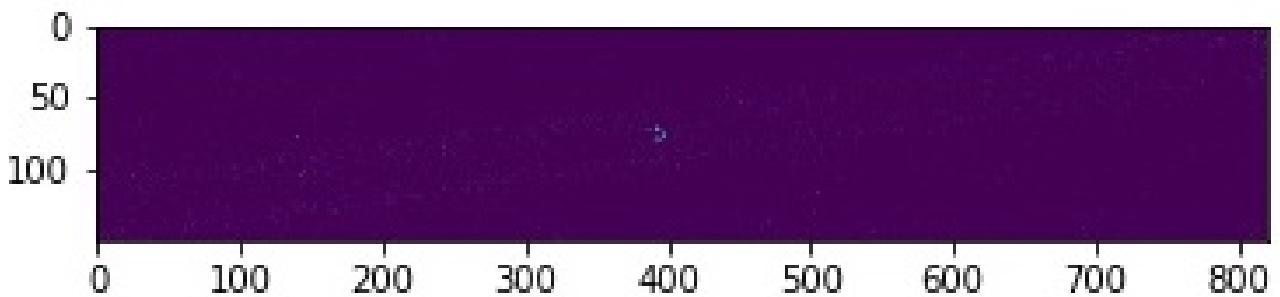


Figura 9: Differenza tra due immagini, la goccia d'olio il punto luminoso al centro della figura

Le coordinate r_i del punto luminoso sono state calcolate attraverso l'Eq. 1.

$$r_x = \frac{\sum_{x,y} L(x,y)x}{\sum_{x,y} L(x,y)} \quad r_y = \frac{\sum_{x,y} L(x,y)y}{\sum_{x,y} L(x,y)} \quad (1)$$

Dove x e y sono gli assi coordinati orizzontale e verticale, rispettivamente, in Fig. 9 e $L(x,y)$ è la luminosità del pixel (x,y) .

Questa è una procedura analoga a quella che si usa per determinare il centro di massa.¹

Sono stati quindi convertiti i pixel percorsi in mm e i fotogrammi in secondi ed è stato quindi rappresentata la distanza percorsa in funzione del tempo facendo il fit con la stessa funzione $x(t) = A\sqrt{t}$ (Fig. 10).

Attraverso questo fit otteniamo che $A = 4.34 \pm 0.03$. È possibile notare come l'errore sia più grande rispetto a quelli ottenuti precedentemente Fig. 7 a causa della conversione pixel-tacchette-micron. Tuttavia, mentre nei fit precedenti si nota che non sempre i punti sperimentali seguano l'andamento della funzione di fit, in questo sembra che questo accada. Ancora una volta, però, il valore di A non è in accordo con quelli trovati prima, forse perchè in questo caso l'esperimento è durato soltanto un minuto.

¹La maggior parte del lavoro è stato trovare il modo di rimuovere il rumore, ma non spiego come si è fatto perchè è noioso e non è rilevante ai fini della relazione

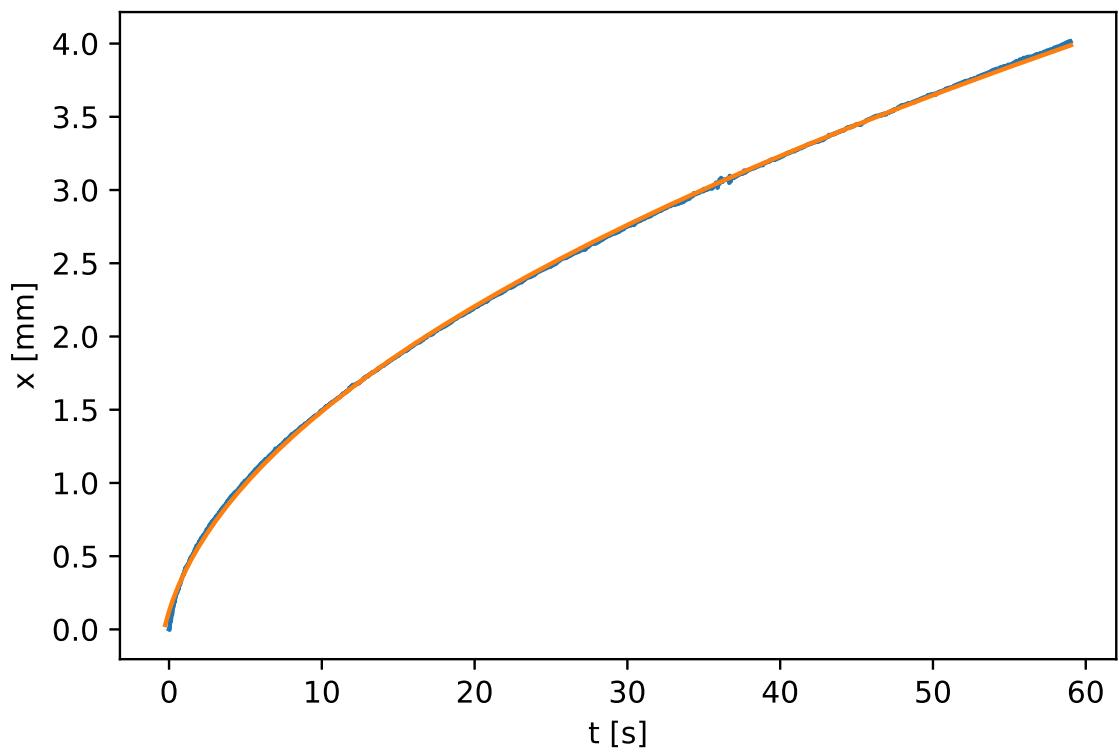


Figura 10: I punti sperimentali sono in blu e il fit è arancione