

**UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI GENOVA**

**SCUOLA POLITECNICA**

**DIME**

**Dipartimento di Ingegneria Meccanica, Energetica,  
Gestionale e dei Trasporti**



**TESI DI LAUREA  
IN  
INGEGNERIA MECCANICA**

**Analisi di una superficie superidrofobica e di una LIS  
realizzate tramite elettrofilatura**

**Relatore:**  
Ch.mo Prof. Alessandro Bottaro

**Candidato:** Giacomo Cafarchia

**Correlatore:**  
Dr. Alberto Lagazzo

Settembre 2023

# **Analisi di una superficie superidrofobica e di una LIS realizzate tramite elettrofilatura**

## **Sommario**

Dall'osservazione della natura nasce l'interesse di ricreare superfici che minimizzino l'interazione con l'acqua.

Oggetto di questa trattazione è la realizzazione di una superficie nanostrutturata e la seguente analisi sperimentale con l'obiettivo di valutarne le prestazioni misurando le grandezze caratteristiche.

Caratteristica imprescindibile è il mantenimento di uno strato di gas tra le asperità superficiali del solido e il liquido sovrastante, ciò facilita lo scorrimento del liquido sul solido con una conseguente riduzione dell'attrito; tuttavia si assiste a un rapido esaurimento dello strato di gas e quindi alla perdita delle proprietà desiderate.

Sono state quindi realizzate e studiate tre LIS (Liquid-Infused Surface) impregnando con tre diversi oli la superficie nanostrutturata.

# **Analysis of a superhydrophobic surface and of a LIS made by electrospinning**

## **Abstract**

From the observation of nature, the interest in recreating surfaces that minimize interaction with water is born.

The subject of this treatise is the realization of a nanostructured surface and the following experimental analysis with the aim of evaluating its performance by measuring the characteristic quantities.

An essential characteristic is the maintenance of a gas layer between the surface roughness of the solid and the overlying liquid, this facilitates the sliding of the liquid on the solid with a consequent reduction in friction; however, there is a rapid depletion of the gas layer and therefore the loss of the desired properties.

Three LIS (Liquid-Infused Surface) were then created and studied by impregnating the nanostructured surface with three different oils.

# Indice

<b>Sommario</b>	<b>I</b>
<b>Abstract</b>	<b>II</b>
<b>1 Introduzione</b>	<b>1</b>
<b>2 Studio della Letteratura</b>	<b>2</b>
2.1 Superfici SH . . . . .	2
2.2 LIS . . . . .	5
2.3 Applicazioni . . . . .	7
<b>3 Realizzazione di una superficie nanostrutturata</b>	<b>8</b>
3.1 L'elettrofilatura . . . . .	8
3.2 Realizzazione di una superficie elettrofilata di PCL . . . . .	9
3.3 Caratterizzazione morfologica della superficie . . . . .	10
<b>4 Misure degli angoli di contatto per la superficie SH</b>	<b>14</b>
4.1 Apparato sperimentale . . . . .	14
4.2 Misura dell'angolo di contatto statico . . . . .	14
4.3 Misura dell'angolo di tilt . . . . .	16
4.4 Misura dell'angolo di avanzamento e recessione . . . . .	17
<b>5 Analisi del coefficiente di momento di una superficie SH</b>	<b>20</b>
5.1 Preparazione dei provini per il reometro . . . . .	20
5.2 Analisi del coefficiente di momento . . . . .	20
<b>6 Realizzazione di una LIS</b>	<b>25</b>
<b>7 Misure degli angoli di contatto per la LIS</b>	<b>30</b>
7.1 Misura dell'angolo di contatto statico . . . . .	30
7.1.1 Olio di silicone 20 cSt . . . . .	30
7.1.2 Olio di silicone 500 cSt . . . . .	31
7.1.3 Olio di vaselina . . . . .	32
7.2 Misura dell'angolo di tilt . . . . .	32
7.2.1 Olio di silicone 20 cSt . . . . .	33
7.2.2 Olio di silicone 500 cSt . . . . .	33
7.2.3 Olio di vaselina . . . . .	34
7.3 Misura dell'angolo di avanzamento e recessione . . . . .	34
7.3.1 Olio di silicone 20 cSt . . . . .	34
7.3.2 Olio di silicone 500 cSt . . . . .	35
7.3.3 Olio di vaselina . . . . .	35
<b>8 Analisi del coefficiente di momento di una LIS</b>	<b>36</b>
<b>9 Conclusioni</b>	<b>39</b>

**Bibliografia**

**40**

**Simbologia**

**41**

## Elenco delle figure

2.1	Illustrazione delle grandezze presenti nell'equazione di Young . . . . .	2
2.2	Stato di Cassie-Baxter su una superficie microstrutturata . . . . .	3
2.3	Stato di Wenzel su una superficie microstrutturata . . . . .	4
2.4	Stato di Cassie-Baxter su una superficie micro e nanostrutturata . . . . .	4
2.5	Le due possibili configurazioni di un lubrificante su una superficie microstrutturata . . . . .	5
2.6	Influenza della cresta d'olio sull'angolo di contatto per una LIS . . . . .	6
2.7	12 possibili configurazioni nell'interazione tra una goccia e una LIS . . . . .	6
3.8	Macchina per elettrofilatura . . . . .	8
3.9	Schema del processo di elettrofilatura . . . . .	9
3.10	Disco del reometro con rivestimento elettrofilato . . . . .	10
3.11	Disco del reometro con rivestimento elettrofilato 50x . . . . .	10
3.12	Disco del reometro con rivestimento elettrofilato 100x . . . . .	11
3.13	Disco del reometro con rivestimento elettrofilato 200x . . . . .	11
3.14	Film elettrofilato 50x . . . . .	12
3.15	Film elettrofilato 100x . . . . .	12
3.16	Film elettrofilato 200x . . . . .	12
3.17	Film elettrofilato con portata di soluzione 1,2 ml/h 2000x . . . . .	13
4.18	Apparato di misura dell'angolo di contatto statico . . . . .	14
4.19	Misurazioni dell'angolo di contatto statico sulla superficie realizzata con portata di soluzione pari a 1,7 ml/h . . . . .	15
4.20	Misurazioni dell'angolo di contatto statico sulla superficie realizzata con portata di soluzione pari a 1,2 ml/h . . . . .	16
4.21	Angolo di tilt . . . . .	17
4.22	Prova numero 1 per la superficie elettrofilata con portata di soluzione di 1,7 ml/h . . . . .	17
4.23	Prova numero 2 per la superficie elettrofilata con portata di soluzione di 1,7 ml/h . . . . .	18
4.24	Prova numero 3 per la superficie elettrofilata con portata di soluzione di 1,7 ml/h . . . . .	18
4.25	Prova numero 1 per la superficie elettrofilata con portata di soluzione di 1,2 ml/h . . . . .	18
4.26	Prova numero 2 per la superficie elettrofilata con portata di soluzione di 1,2 ml/h . . . . .	18
4.27	Prova numero 3 per la superficie elettrofilata con portata di soluzione di 1,2 ml/h . . . . .	19
5.28	Reometro a piatti paralleli . . . . .	21
5.29	Curve del coefficiente di momento al variare del numero di Reynolds relative alle superfici SH . . . . .	22
5.30	PCL 1, rivestimento elettrofilato applicato tramite incollaggio . . . . .	23
5.31	PCL 2, rivestimento elettrofilato applicato tramite incollaggio . . . . .	23
5.32	PCL 3, rivestimento elettrofilato applicato tramite incollaggio . . . . .	24
6.33	LIS impregnata con olio di silicone 20 cSt 50x . . . . .	25
6.34	LIS impregnata con olio di silicone 20 cSt 100x . . . . .	26

6.35 LIS impregnata con olio di silicone 20 cSt 200x . . . . .	26
6.36 LIS impregnata con olio di silicone 500 cSt 50x . . . . .	27
6.37 LIS impregnata con olio di silicone 500 cSt 100x . . . . .	27
6.38 LIS impregnata con olio di silicone 500 cSt 200x . . . . .	27
6.39 LIS impregnata con olio di vaselina 50x . . . . .	28
6.40 LIS impregnata con olio di vaselina 100x . . . . .	28
6.41 LIS impregnata con olio di vaselina 200x . . . . .	29
7.42 Misure dell'angolo di contatto per una LIS impregnata con olio di silicone 20 cSt . . . . .	30
7.43 Misure dell'angolo di contatto per una LIS impregnata con olio di silicone 500 cSt . . . . .	31
7.44 Misure dell'angolo di contatto per una LIS impregnata con olio di vaselina .	32
7.45 Angolo di tilt per LIS impregnata con olio di silicone 20cSt . . . . .	33
7.46 Angolo di tilt per LIS impregnata con olio di silicone 500cSt . . . . .	33
7.47 Angolo di tilt per LIS impregnata con olio di vaselina . . . . .	34
7.48 Isteresi dell'angolo di contatto per una LIS impregnata con olio di silicone 20 cSt . . . . .	34
7.49 Isteresi dell'angolo di contatto per una LIS impregnata con olio di silicone 500 cSt . . . . .	35
7.50 Isteresi dell'angolo di contatto per una LIS impregnata con olio di vaselina .	35
8.51 Curve del coefficiente di momento al variare del numero di Reynolds relative alle LIS . . . . .	36
8.52 Fig. 8.51 per valori di Reynolds inferiori a 2500 . . . . .	37
8.53 Confronto delle curve del coefficiente di momento per la LIS impregnata con olio di silicone 20 cSt dopo una settimana di immersione . . . . .	37
8.54 Confronto delle curve del coefficiente di momento per la LIS impregnata con olio di silicone 500 cSt dopo una settimana di immersione . . . . .	38
8.55 Confronto delle curve del coefficiente di momento per la LIS impregnata con olio di vaselina dopo una settimana di immersione . . . . .	38

# 1 Introduzione

Osservando la natura si è notato come i fiori di loto, pur avendo come habitat zone paludose, siano sempre puliti. Ciò è possibile grazie al loro rivestimento costituito da cristalli di cera idrofobica di dimensioni nanometriche che portano alla formazione di uno strato di gas che rimane intrappolato fra essi, diminuendo la reale area di contatto fra la superficie e l'acqua. Questa condizione porta le gocce a scivolare con facilità sulla superficie agevolando la pulizia. Simili strutturazioni delle superfici sono osservabili anche sulle ali di farfalle e di falene, sempre per favorire l'autopulizia.

Oggetto di questa trattazione è la realizzazione di una superficie nanostrutturata tramite elettrofilatura da una soluzione di policaprolattone, successivamente sono state condotte delle misure in laboratorio per definire le grandezze caratteristiche quali l'angolo di contatto statico, l'angolo di tilt e l'isteresi dell'angolo di contatto e le curve relative al coefficiente di momento al variare del numero di Reynolds.

Vari fenomeni possono portare a un rapido esaurimento dello strato di gas, nasce quindi l'interesse per lo studio delle LIS, ovvero delle superfici nelle cui porosità è stabilizzato un lubrificante. Queste superfici presentano una maggiore stabilità pur permettendo di ottenere proprietà simili alle superfici superidrofobiche.

Oggetto di studio di questa tesi sono anche la realizzazione di tre diverse LIS, impregnando con tre diversi oli la superficie elettrofilata realizzata in precedenza, e il successivo sviluppo delle analisi sperimentali per la definizione delle loro grandezze caratteristiche.

## 2 Studio della Letteratura

### 2.1 Superfici SH

Si introduce una misura macroscopica di bagnabilità: l'angolo di contatto statico  $\alpha$ , ossia l'angolo tra la tangente alla superficie e la tangente all'interfaccia liquido-gas nel punto di intersezione tra le tre fasi.

Una superficie viene definita idrofila se presenta un angolo di contatto minore di  $90^\circ$ , idrofobica se l'angolo di contatto è superiore ai  $90^\circ$ . Nel caso l'angolo di contatto superi i  $150^\circ$  la superficie viene definita superidrofobica.

L'angolo di contatto statico dipende esclusivamente dalle caratteristiche del gas, del solido e del liquido. Viene introdotta l'energia di interfaccia o di superficie, denominata  $\gamma_{AB}$ , essa rappresenta il lavoro per unità di area necessario ad aumentare la superficie della sostanza A in contatto con la sostanza B.

La bagnabilità di un solido rispetto all'acqua è frutto di un bilancio tra le forze coesive del fluido e le forze adesive dell'interfaccia tra solido e liquido. Questo bilancio di forze è stato per primo proposto da Young, si riporta di seguito l'equazione che prende il suo nome.

$$A = \gamma_{SG} - \gamma_{LS} = \gamma_{LG} \cos \alpha \quad (2.1)$$

La grandezza  $A$  è la tensione di adesione, i pedici L, S e G denotano rispettivamente le tre fasi liquida solida e gassosa

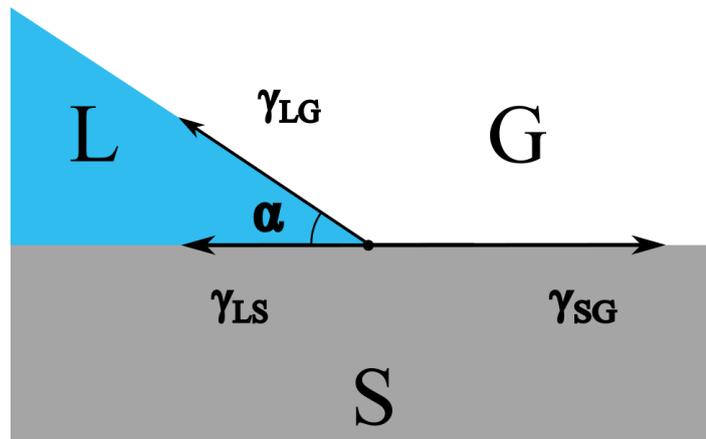


Fig. 2.1 – Illustrazione delle grandezze presenti nell'equazione di Young

L'equazione 2.1 tuttavia ha un'utilità pratica limitata a causa della difficoltà nella misura delle energie superficiali  $\gamma_{SG}$  e  $\gamma_{LS}$ , l'energia superficiale  $\gamma_{LG}$  invece è di più facile determinazione e assume il nome di tensione superficiale e può essere denominata semplicemente  $\gamma$ .

L'equazione di Young non tiene conto della rugosità della superficie, parametro importante nello studio delle superfici superidrofobiche. Wenzel fu il primo a proporre una trattazione che tenesse conto delle asperità superficiali del solido, ciò ha permesso di analizzare i fenomeni di superidrofobicità in condizioni più aderenti alla realtà. La grandezza  $A$  nell'equazione 2.1 viene sostituita dalla tensione effettiva di adesione, ossia il prodotto di  $A$  e del fattore di rugosità  $r$ .

$$rA = \gamma \cos \alpha_W \quad (2.2)$$

La presenza del parametro  $r \geq 1$  nell'equazione indica la dipendenza della tensione effettiva di adesione non solo dalla composizione chimica delle tre fasi (di cui si tiene conto in  $A$ ) ma anche dalla morfologia della superficie,  $rA$  è solitamente misurato sperimentalmente.  $\alpha_W$  è dato da

$$\cos \alpha_W = r \cos \alpha \quad (2.3)$$

Lo studio dell'idrofobicità è complicato dalla presenza di un fenomeno detto isteresi dell'angolo di contatto, si può osservare quando si ha una goccia in stato di quiete su un piano inclinato: la goccia presenta due angoli di contatto differenti tra la sua parte anteriore e quella posteriore. La parte anteriore presenta una curvatura più alta rispetto a quella posteriore e di conseguenza si ha una differenza di pressione di Laplace tale da bilanciare il peso della goccia. L'isteresi dell'angolo di contatto viene definita come  $\Delta\alpha = \alpha_a - \alpha_r$  dove  $\alpha_a$  è detto angolo di avanzamento ed è l'angolo di contatto che la goccia assume quando l'interfaccia tra le tre fasi avanza,  $\alpha_r$  è detto angolo di recessione ed è l'angolo di contatto che la goccia assume quando l'interfaccia recede. Se la superficie viene inclinata oltre un certo angolo  $\theta$  detto angolo di tilt la goccia comincia a scivolare e presenta angolo di contatto pari a  $\alpha_a$  sulla sua parte anteriore e  $\alpha_r$  sulla sua parte posteriore. Tanto più è elevata l'isteresi dell'angolo di contatto tanto maggiore sarà l'angolo di tilt.

Le categorizzazioni della superficie basate sull'angolo di contatto statico sopra elencate sono valide solamente se l'isteresi dell'angolo di contatto è minore di  $5^\circ$ .

Se la fase gassosa resta intrappolata nelle asperità del solido l'area di contatto tra solido e liquido diminuisce ed è ottenibile la superidrofobicità, questo fenomeno è noto come stato di Cassie-Baxter.

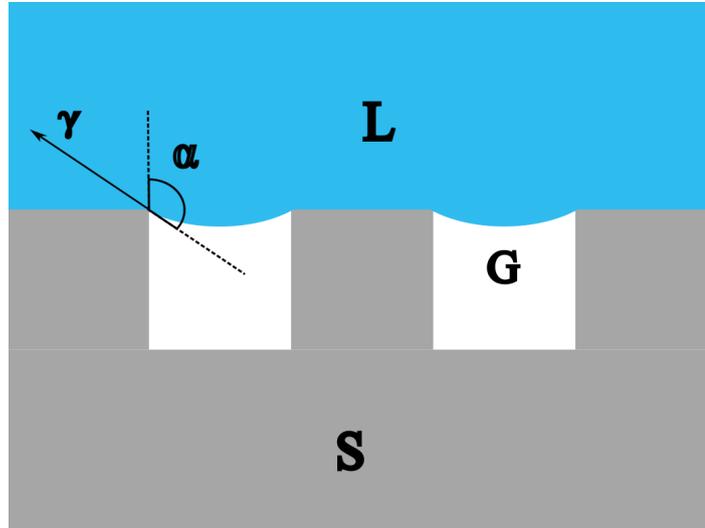


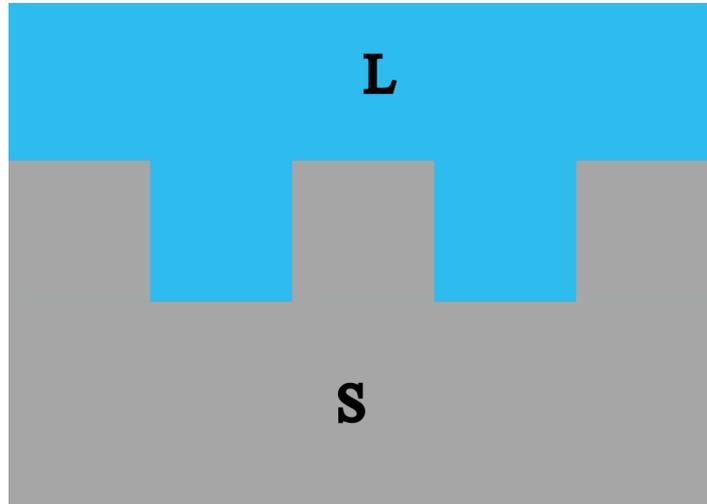
Fig. 2.2 – Stato di Cassie-Baxter su una superficie microstrutturata

Il mantenimento dello stato di gas è fortemente influenzato dalla morfologia della superficie. Cassie-Baxter hanno proposto la seguente relazione per ricavare l'angolo di contatto  $\alpha_F$ :

$$\cos \alpha_F = f_1 \cos \alpha - f_2 \quad (2.4)$$

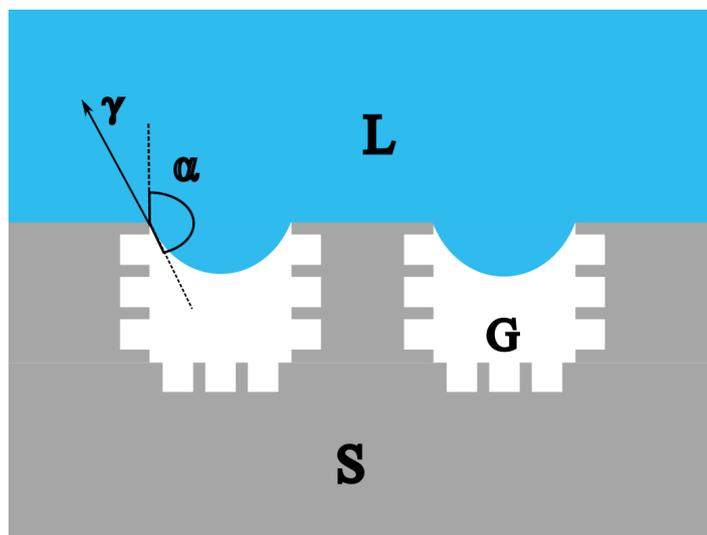
dove  $f_1$  è definito come la superficie di solido per unità di area proiettata sotto la goccia,  $f_2 = 1 - f_1$  è definito allo stesso modo per l'interfaccia liquido-gas.

Si nota che per una superficie liscia e omogenea, ovvero per cui  $r \rightarrow 1$ , si ha  $\alpha_F = \alpha_W = \alpha$ . Una superficie microstrutturata subisce un rapido esaurimento dello strato di gas che porta l'instaurazione dello stato di Wenzel.



*Fig. 2.3 – Stato di Wenzel su una superficie microstrutturata*

Questa transizione in condizioni statiche avviene al di sopra di una differenza di pressione critica tra il liquido e il gas, essa è funzione della scala delle rugosità, dell'angolo di contatto  $\alpha$  e della tensione superficiale  $\gamma$ . Inoltre se non viene raggiunta la differenza di pressione critica la transizione allo stato di Wenzel può avvenire a causa della solubilità del gas nel liquido, di reazioni chimiche o effetto Marangoni, seppur in tempi più lunghi. La transizione può essere evitata o almeno posticipata a valori più alti di pressione critica utilizzando una superficie nanostrutturata.



*Fig. 2.4 – Stato di Cassie-Baxter su una superficie micro e nanostrutturata*

Su una superficie nanostrutturata si hanno valori di  $\alpha$  prossimi a  $180^\circ$ , ciò porta a una configurazione energetica più stabile dato che la tensione superficiale  $\gamma$  riesce a bilanciare in maniera più efficace la differenza di pressione tra liquido e gas.

## 2.2 LIS

Una LIS (Lubricant Infused Surface) è composta da un lubrificante che è stabilizzato all'interno di una superficie porosa dalle forze capillari. L'interfaccia tra una LIS e un fluido immiscibile (in seguito chiamato fluido di lavoro) con il lubrificante risulta in alcune proprietà interessanti, se il sistema è progettato correttamente il fluido di lavoro non intacca il lubrificante. Nell'interazione con il solido il lubrificante può assumere due diverse configurazioni d'equilibrio: il lubrificante può riempire le cavità lasciando emergere le parti che più protrudono del solido, nella seconda configurazione il lubrificante crea un film sopra il solido il cui spessore dipende dalle forze intermolecolari. Nel seguito si farà riferimento al lubrificante come olio.

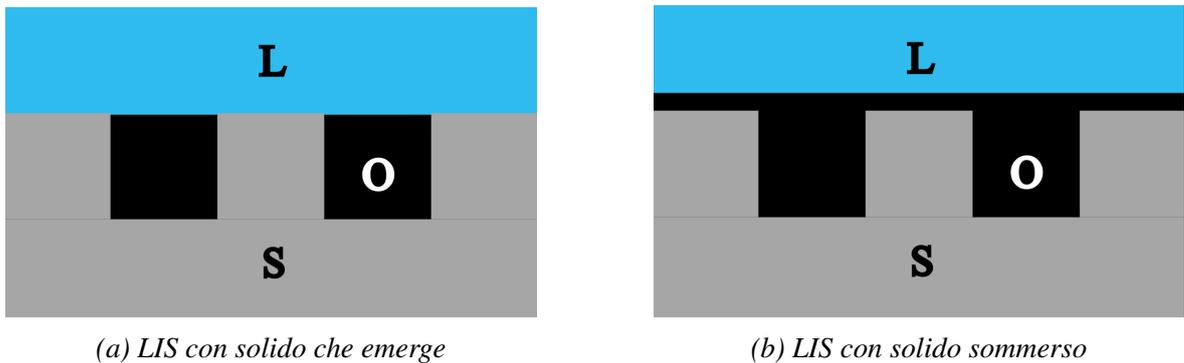


Fig. 2.5 – Le due possibili configurazioni di un lubrificante su una superficie microstrutturata

Nel caso illustrato in Fig. 2.5a il liquido di lavoro interagisce sia con il solido che con l'olio, la tensione di adesione risulta quindi essere

$$A_E = (r - f_1)\gamma_{OS} + f_1\gamma_{SL} + f_2\gamma_{OL} \quad (2.5)$$

dove col pedice  $O$  si indica l'olio. Per il caso illustrato in Fig. 2.5b invece il liquido di lavoro non ha interazioni con il solido, la relativa tensione di adesione sarà dunque

$$A_S = \gamma_{OL} + r\gamma_{OS} \quad (2.6)$$

Una differenza notevole tra lo studio delle superfici SH e delle LIS è la formazione di una cresta di olio alla base della goccia, questo porterà a una diminuzione dell'angolo di contatto che dipende dall'altezza della cresta.

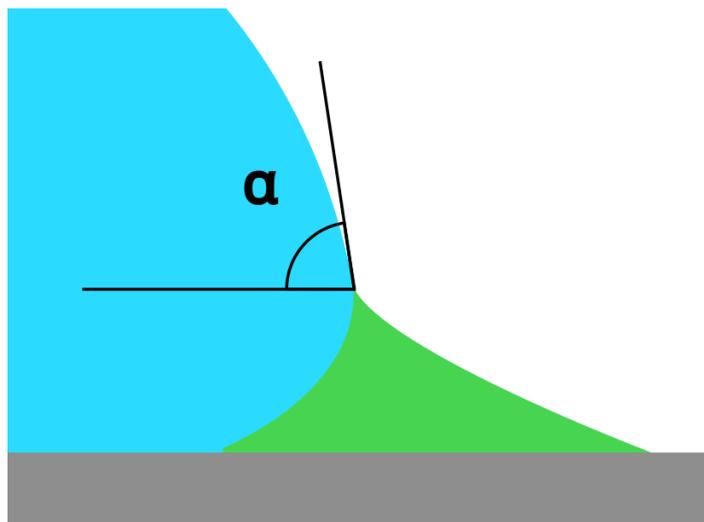


Fig. 2.6 – Influenza della cresta d'olio sull'angolo di contatto per una LIS

Nell'interazione di una goccia con una LIS, a seconda delle tensioni di interfaccia agenti, si può creare una linea di contatto fra tre fasi dove si interfacciano la goccia, il solido e il lubrificante, una linea di contatto tra il lubrificante, la goccia e il gas, entrambe o nessuna delle due. Ciò porta a 12 possibili configurazioni nell'interazione tra una goccia e una LIS, riportate in Fig. 2.7.

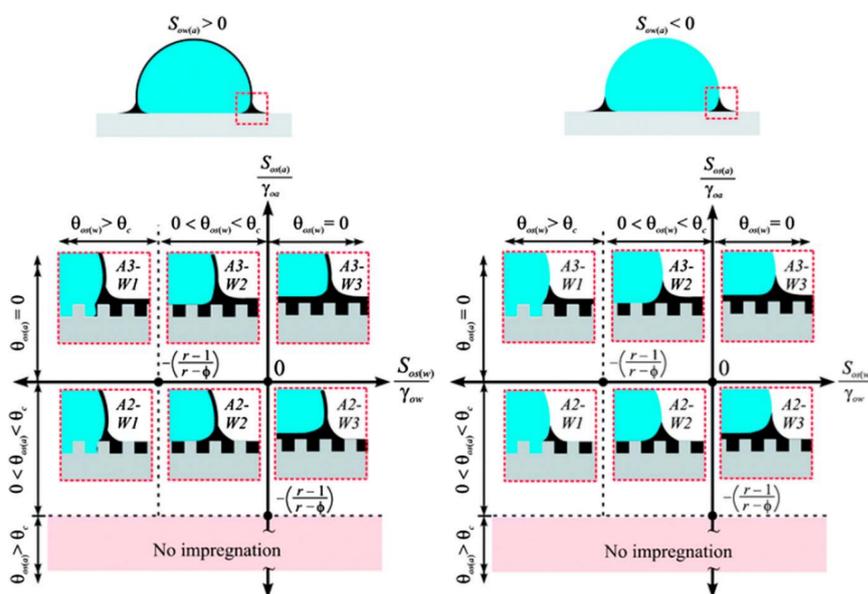


Fig. 2.7 – 12 possibili configurazioni nell'interazione tra una goccia e una LIS

È stata inoltre osservata la nucleazione spontanea di bolle di dimensioni nanometriche sulle LIS, che riempiendo le rugosità della superficie sono in parte responsabili della riduzione dell'attrito viscoso, riproducendo l'effetto del plastron sulle superfici SH.[7]

## 2.3 Applicazioni

Le superfici superidrofobiche e le LIS grazie alle loro proprietà suscitano interesse in diversi settori.

Grazie alla loro proprietà di autopulizia possono essere utilizzate per diminuire i depositi di sporco su pannelli solari e pale eoliche, per i parabrezza, per il rivestimento di apparecchiature elettroniche e per diminuire i depositi biologici su apparecchiature mediche.

Altri usi comuni sono la protezione dall'accumulo di ghiaccio sulle ali degli aerei o sulle linee di trasmissione.

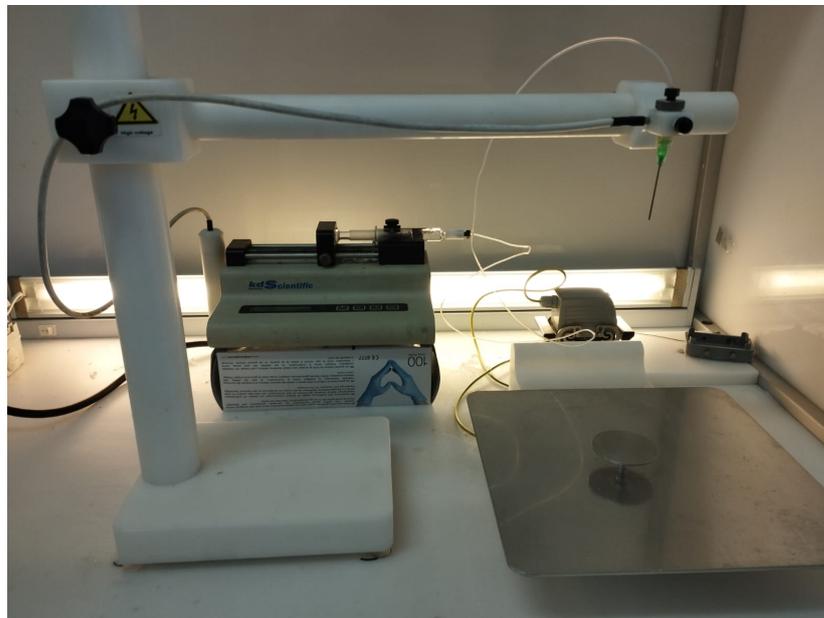
Sviluppi futuri mirano all'applicazione di rivestimenti superidrofobici sulla carena delle navi per la riduzione dell'attrito con l'acqua con conseguente riduzione dei consumi e delle emissioni. Inoltre la carena delle navi è soggetta alla creazione di un biofilm a cui si attaccano organismi di dimensioni più grandi che incrementano notevolmente l'attrito, portando a un sensibile aumento della potenza necessaria a mantenere la velocità di crociera.

Le LIS in particolare suscitano interesse per l'agevolazione della condensazione a goccia nei condensatori degli impianti a vapore, in questo modo il vapore è sempre a contatto con la superficie e non con un film di acqua condensata che peggiora lo scambio termico. Le superfici SH non si prestano per questo utilizzo poichè la nucleazione delle gocce può avvenire all'interno delle cavità del solido portando all'instaurazione dello stato di Wenzel e perdendo quindi le proprietà desiderate.

## 3 Realizzazione di una superficie nanostrutturata

### 3.1 L'elettrofilatura

L'elettrofilatura è un processo che, sfruttando un campo elettrico, permette la produzione di una membrana costituita da fibre di materiale polimerico. Il polimero viene fornito alla macchina allo stato liquido, ottenibile sia attraverso la dissoluzione del polimero in un opportuno solvente o attraverso la fusione del polimero stesso, la seconda soluzione è meno utilizzata poichè applicabile solo ai polimeri termoplastici, ovvero quelli per cui la temperatura di fusione è notevolmente minore della temperatura di degradazione. Per questa ragione in seguito si farà riferimento solo all'elettrofilatura da soluzione. Un attento controllo delle condizioni operative della macchina e delle proprietà della soluzione di polimero consente la produzione di strutture altamente porose di nanofibre lisce e non intrecciate.



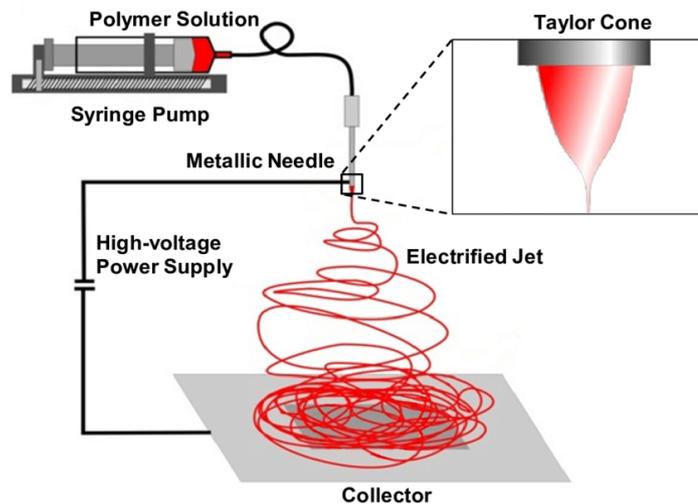
*Fig. 3.8 – Macchina per elettrofilatura*

La macchina è costituita dai seguenti elementi:

- Una pompa volumetrica per la regolazione della portata di polimero
- Una siringa di vetro contenente la soluzione
- Un elettrodo messo a contatto con la soluzione
- Un elettrodo a contatto con un collettore metallico
- Un generatore di alta tensione collegato ai due elettrodi

La pompa volumetrica garantisce una portata costante dell'ordine di pochi  $ml/h$  in uscita dalla siringa, la soluzione viene fatta fluire attraverso un ago che ha anche la funzione di essere l'elettrodo a contatto con la soluzione. Il generatore di tensione crea un'elevata differenza di potenziale tra l'ago e il collettore: quando la forza esercitata dal campo elettrico

sulla soluzione supera la tensione superficiale della goccia fuoriuscente dall'ago si crea un getto che venendo attirato dal collettore viene stirato, il suo diametro diminuisce e la sua lunghezza aumenta, l'evaporazione del solvente contribuisce alla diminuzione del diametro delle fibre. Le instabilità durante questa fase portano a una disposizione casuale delle fibre sul collettore.



*Fig. 3.9 – Schema del processo di elettrofilatura*

### **3.2 Realizzazione di una superficie elettrofilata di PCL**

Per la realizzazione tramite elettrofilatura di una superficie nanostrutturata sono stati adottati dei parametri di processo già precedentemente ottimizzati per il policaprolattone (PCL), un polimero biodegradabile.

Il solvente è composto da acetone e acido acetico (3:7 V/V), sono stati preparati 100 ml per avere abbastanza solvente per la pulizia dell'ago, dei supporti dell'ago e del tubo di alimentazione del polimero. La soluzione è composta da 0,2 g di PCL per ml di solvente: sono stati disciolti 2g di PCL in 10ml di solvente. La soluzione è stata posta su una piastra riscaldata ad agitazione magnetica (450 rpm, 60°C) per circa 1 ora per facilitare la dissoluzione del polimero nel solvente, fino al raggiungimento di una soluzione omogenea caratterizzata da un'elevata viscosità. Dopodichè la soluzione è stata aspirata con la siringa, e tramite la stessa è stata fatta fluire fino a riempire totalmente il tubo: nel momento in cui la prima goccia di soluzione fuoriesce dall'ago è possibile attivare la macchina.

I parametri di processo adottati sono elencati di seguito:

- Voltaggio: 19 kV
- Portata: 1,7 ml/h
- Distanza ago-collettore: 16,5 cm
- Diametro del foro dell'ago: 0,8 mm

La durata del processo è variabile a seconda dello spessore del rivestimento che si vuole ottenere, in questo caso è stata adottata una durata del processo di 4h.



*Fig. 3.10 – Disco del reometro con rivestimento elettrofilato*

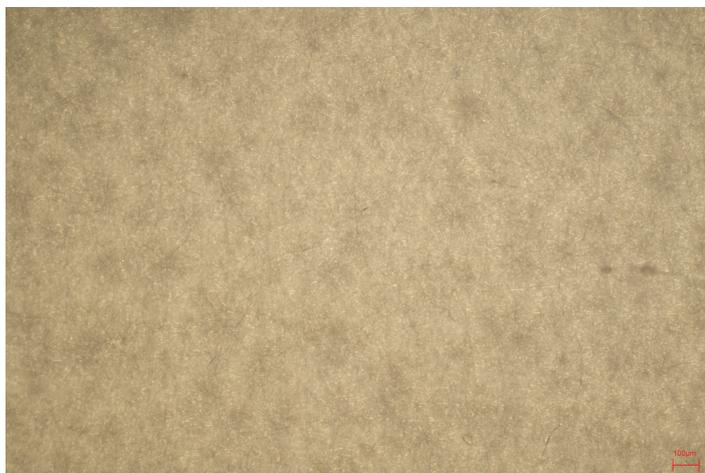
L'elettrofilatura è stata effettuata sia sul disco del reometro appoggiato al collettore, sia direttamente sul collettore stesso. Nel secondo caso è stata applicata della vaselina sul collettore per facilitare il distacco della membrana al termine del processo.

A causa di problemi con la macchina per l'elettrofilatura non è stato possibile realizzare abbastanza campioni per tutte le prove successive, è stata quindi utilizzata anche una membrana prodotta in passato (circa un anno prima) prodotta con la stessa soluzione e stessi parametri di processo ma con una portata di soluzione leggermente minore pari a 1,2 ml/h.

### **3.3 Caratterizzazione morfologica della superficie**

La superficie è stata caratterizzata al microscopio ottico a diversi ingrandimenti.

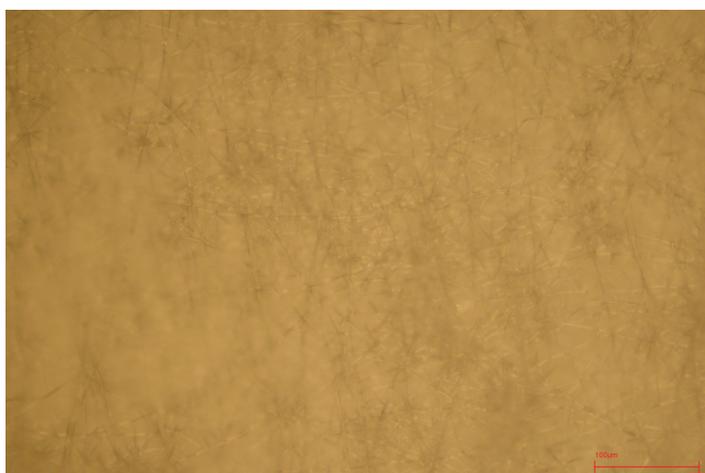
É stata prima osservata la superficie elettrofilata direttamente sul disco del reometro a tre diversi ingrandimenti con luce riflessa.



*Fig. 3.11 – Disco del reometro con rivestimento elettrofilato 50x*

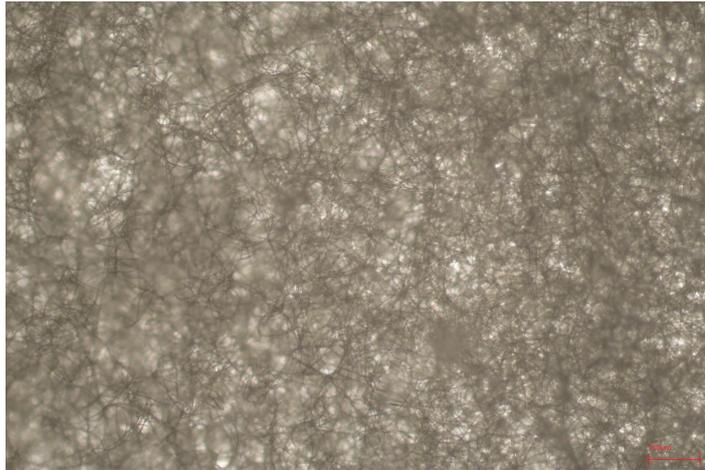


*Fig. 3.12 – Disco del reometro con rivestimento elettrofilato 100x*

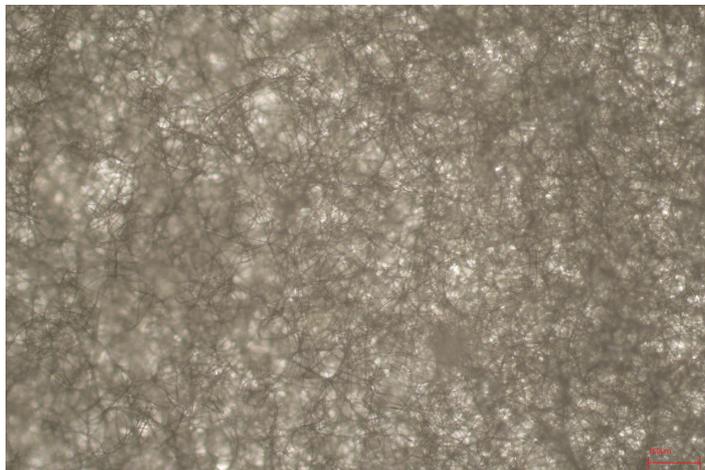


*Fig. 3.13 – Disco del reometro con rivestimento elettrofilato 200x*

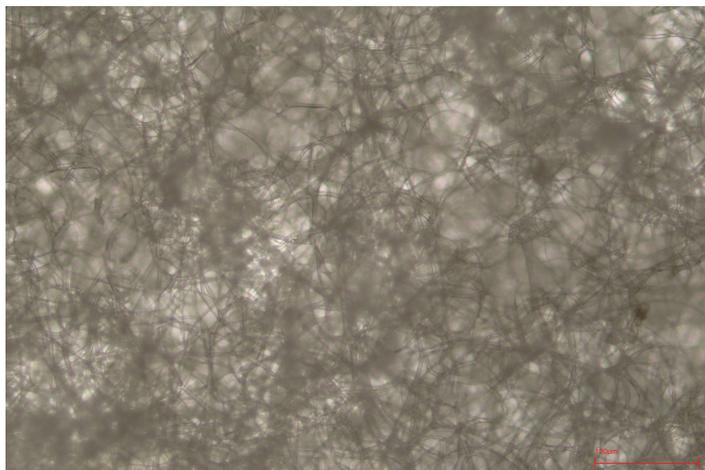
Non è stato possibile adottare ingrandimenti maggiori per le difficoltà nella messa a fuoco. È stata poi osservata la membrana distaccata dal collettore, in questo caso è stato possibile adottare l'illuminazione trasmessa attraverso il campione. Inoltre è stato appoggiato un vetrino sopra il campione per garantire una superficie sufficientemente piatta per ottenere un'immagine di qualità.



*Fig. 3.14 – Film elettrofilato 50x*

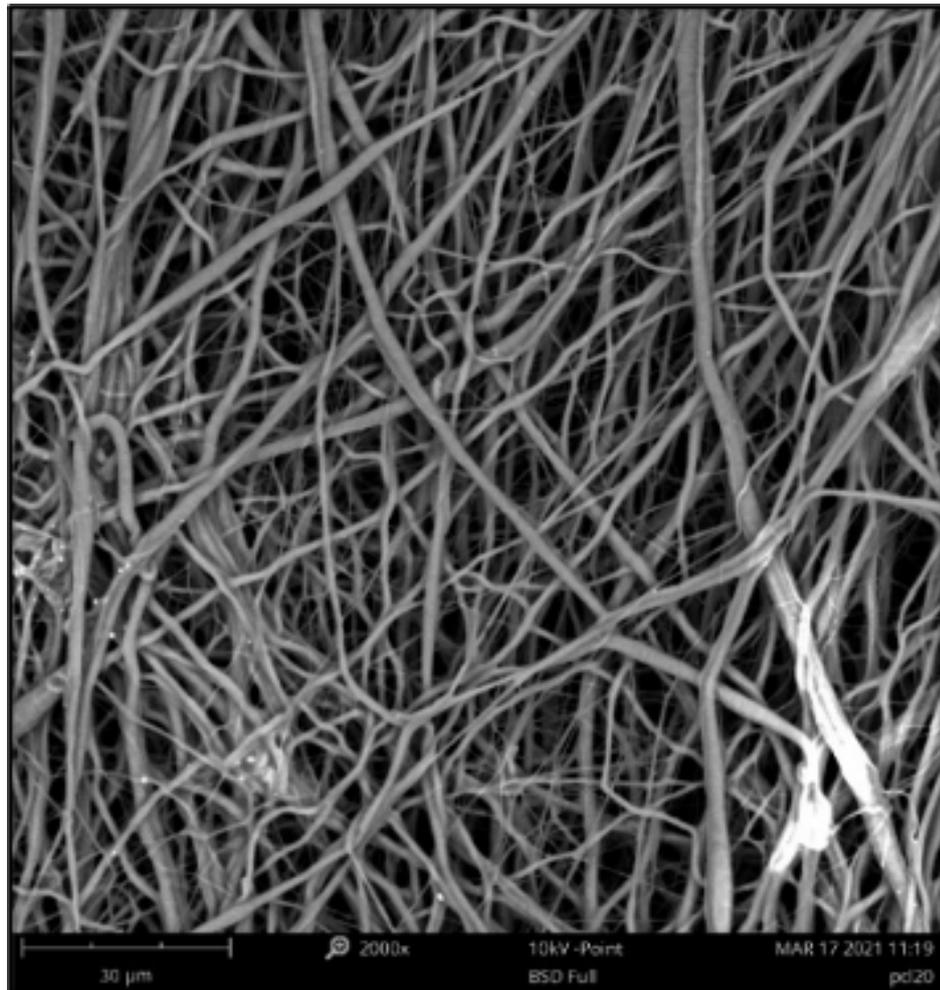


*Fig. 3.15 – Film elettrofilato 100x*



*Fig. 3.16 – Film elettrofilato 200x*

Come nel caso precedente non è stato possibile adottare ingrandimenti maggiori per difficoltà nella messa a fuoco. Da queste immagini è meglio apprezzabile la disposizione casuale delle fibre e l'elevata porosità della superficie, inoltre la presenza di zone sfocate evidenzia come la superficie non abbia uno spessore costante ma presenti delle asperità. La superficie elettrofilata con portata di soluzione di 1,2 ml/h era stata precedentemente caratterizzata al SEM.



*Fig. 3.17 – Film elettrofilato con portata di soluzione 1,2 ml/h 2000x*

Si nota come le fibre abbiano una maggiore tendenza a raggrupparsi in alcune direzioni rispetto alla superficie realizzata con portata di soluzione pari a 1,7 ml/h.

## 4 Misure degli angoli di contatto per la superficie SH

### 4.1 Apparato sperimentale

L'apparato sperimentale è costituito da una telecamera ad alta definizione che tramite un software permette di acquisire le immagini, una micropipetta graduata con cui una goccia d'acqua viene depositata sulla superficie da analizzare, la micropipetta viene movimentata lungo l'asse verticale con una manopola in modo da non far cadere la goccia sulla superficie ma appoggiarla. La piattaforma di misura è movimentabile lungo i tre assi in modo da ridurre al minimo l'errore di parallasse. Una sorgente di luce è posta dal lato opposto della piattaforma rispetto alla telecamera per ottenere un'immagine più nitida della goccia.



*Fig. 4.18 – Apparato di misura dell'angolo di contatto statico*

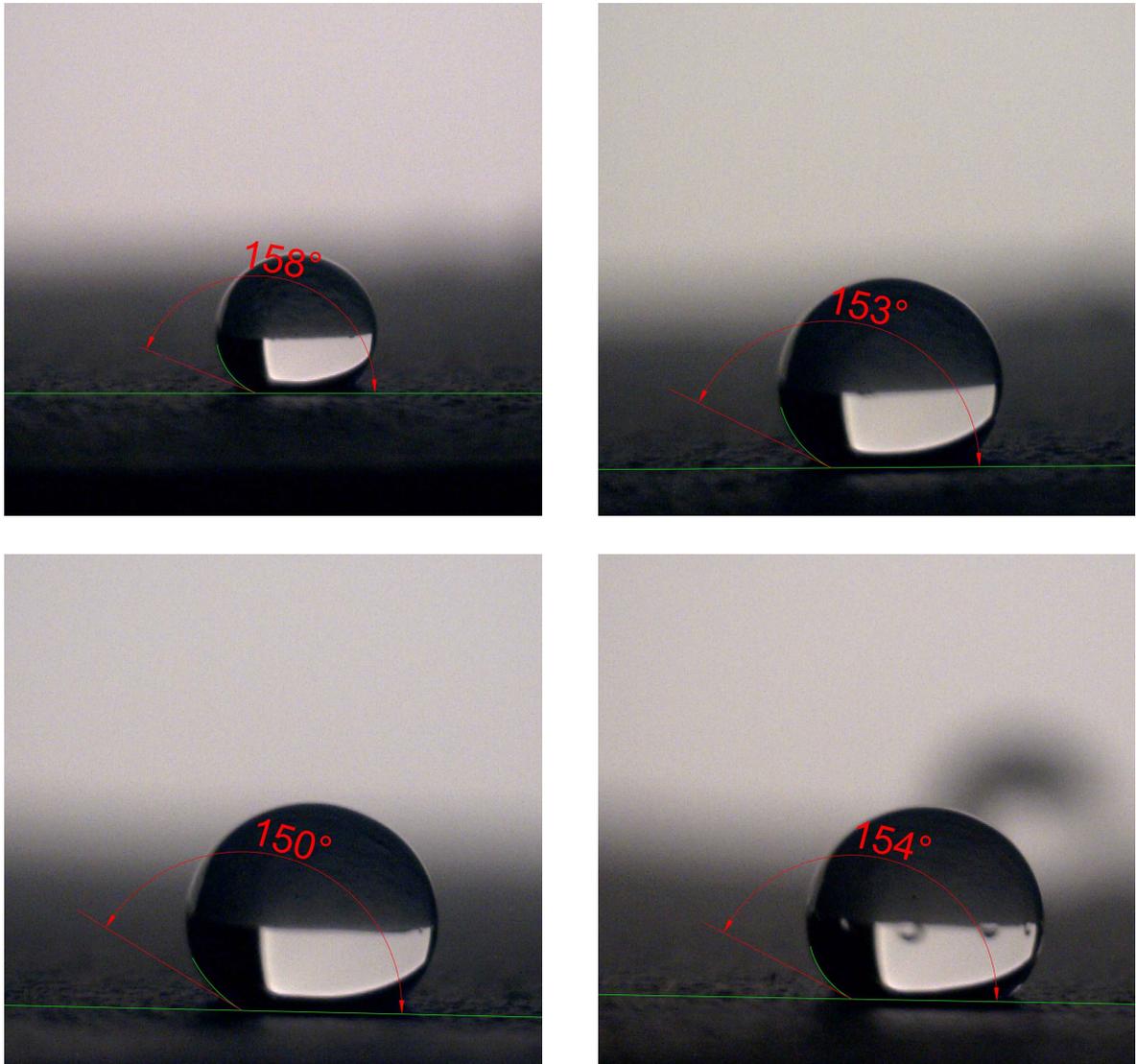
Prima della misura è necessario regolare la messa a fuoco della telecamera. È stato utilizzato un software CAD per estrapolare il valore dell'angolo di contatto statico dalle immagini acquisite.

### 4.2 Misura dell'angolo di contatto statico

Nel software CAD viene tracciato un segmento orizzontale coincidente con la superficie e un arco passante per tre punti che approssimi al meglio la forma della goccia in prossimità dell'interfaccia con il solido. Dopodichè viene tracciata la tangente all'arco nel punto di interfaccia tra liquido e solido, infine tramite una quotatura angolare si perviene alla misura dell'angolo di contatto statico.

La misura viene ripetuta in diversi punti della superficie per tenere conto delle variazioni morfologiche date dalla disposizione casuale delle fibre elettrofilate: la misura finale dell'angolo di contatto statico sarà la media delle singole misure. Vengono riportate di seguito

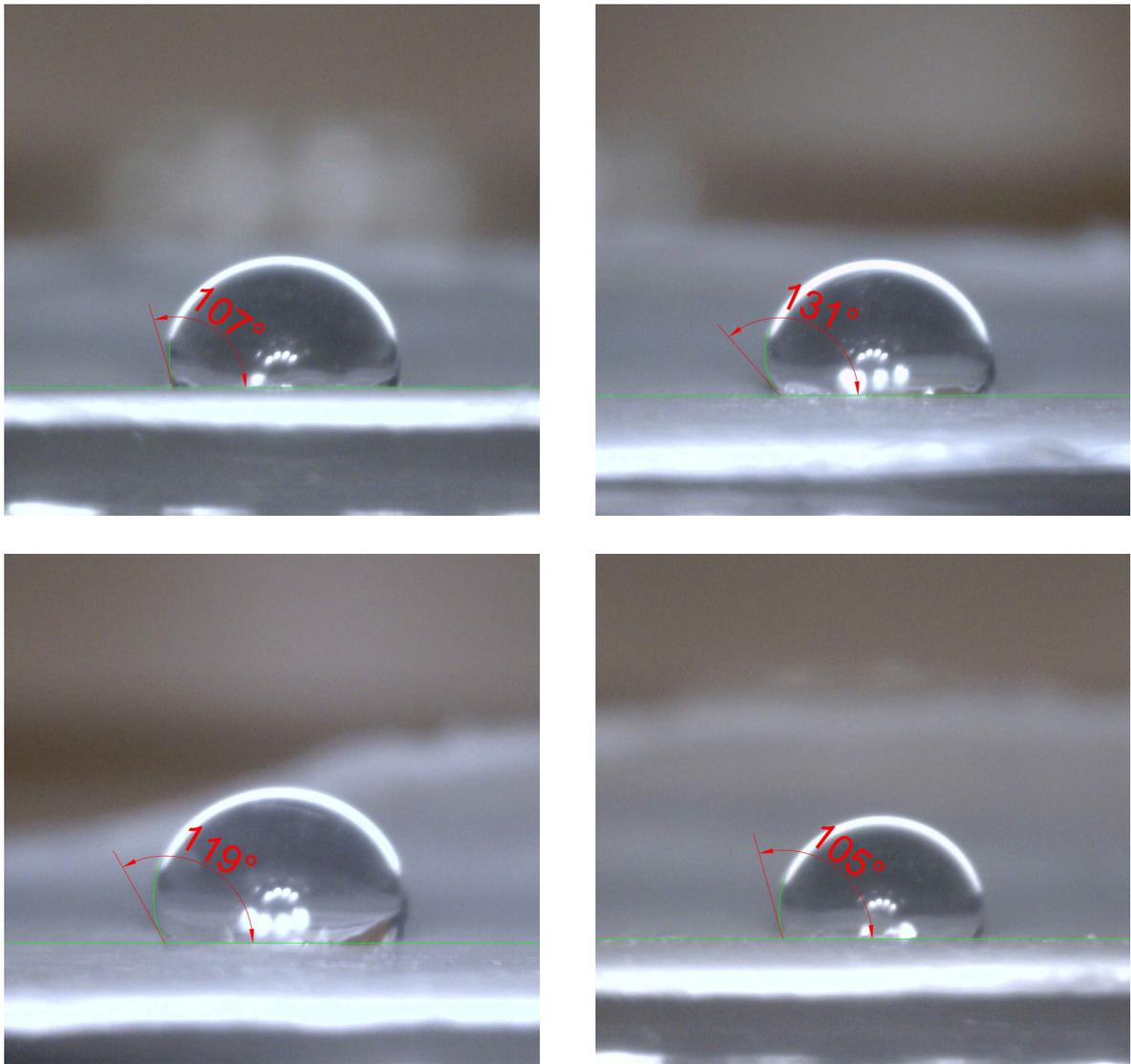
le misure dell'angolo di contatto statico per la superficie realizzata con portata di polimero pari a 1,7 ml/h.



*Fig. 4.19 – Misurazioni dell'angolo di contatto statico sulla superficie realizzata con portata di soluzione pari a 1,7 ml/h*

Dalla media di queste misure risulta  $\alpha=154^\circ$ .

Si riportano di seguito le misure dell'angolo di contatto statico per la seconda superficie realizzata con portata di soluzione pari a 1,2 ml/h.



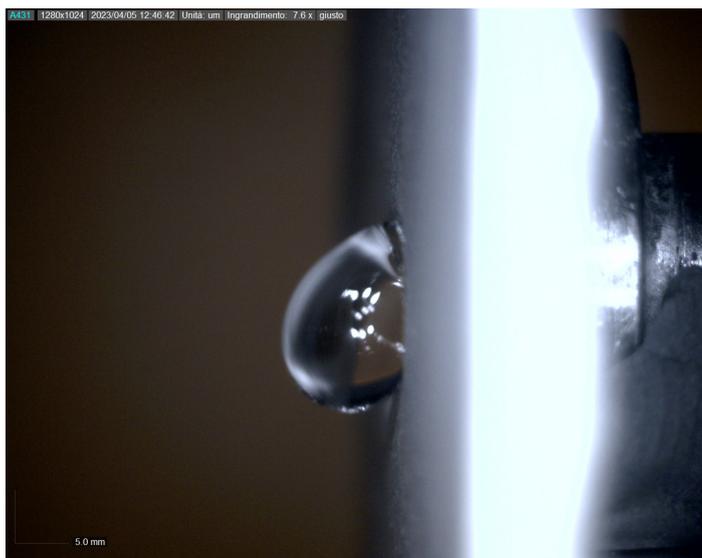
*Fig. 4.20 – Misurazioni dell'angolo di contatto statico sulla superficie realizzata con portata di soluzione pari a 1,2 ml/h*

I valori dell'angolo di contatto statico risultano leggermente minori, con un valore medio pari a  $116^\circ$ , rispetto alla superficie realizzata con portata di soluzione di 1,7 ml/h, la causa è attribuibile alla morfologia leggermente diversa con cavità di maggiori dimensioni. La biodegradabilità del policaprolattone, considerando che questa superficie è stata realizzata circa un anno prima, potrebbe aver avuto un'influenza sul valore dell'angolo di contatto.

### **4.3 Misura dell'angolo di tilt**

L'angolo di tilt è definito come l'angolo minimo di scorrimento, ovvero il minimo angolo di inclinazione della superficie per cui la goccia, precedentemente poggiata sul materiale in condizioni di equilibrio, tende a scivolare via.

Per la misurazione di questa grandezza è stato utilizzato lo stesso strumento utilizzato per la misura dell'angolo di contatto statico, tramite una manopola è possibile inclinare la piattaforma di misura. La misura è sempre stata effettuata tramite software CAD.



*Fig. 4.21 – Angolo di tilt*

L'angolo di tilt risulta maggiore di  $90^\circ$  sia per la superficie realizzata con portata di soluzione pari a 1,7 ml/h che per quella realizzata con portata di 1,2 ml/h: anche con la superficie in verticale la goccia non scivola. Questo è attribuibile sia alla capillarità, che porta all'instaurazione dello stato di Wenzel, che all'affinità del polimero con l'acqua. Si nota come l'isteresi dell'angolo di contatto sia ben superiore a  $5^\circ$ . Per misurare in modo più preciso l'isteresi dell'angolo di contatto è necessaria la misura dell'angolo di avanzamento e dell'angolo di recessione.

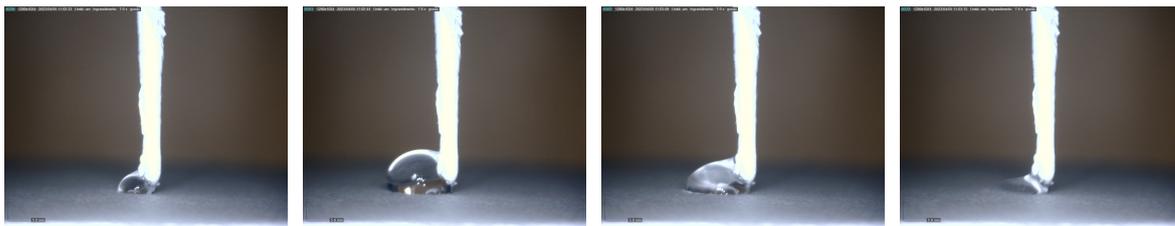
#### **4.4 Misura dell'angolo di avanzamento e recessione**

L'apparato sperimentale è uguale a quello utilizzato per la misura dell'angolo di contatto statico, la micropipetta viene sostituita da una pompa volumetrica che ha funzione di far fuoriuscire da un ago posizionato a circa 2 mm dalla superficie una portata sufficientemente bassa di acqua tale da permettere l'acquisizione delle immagini in fase di avanzamento e di recessione della goccia. Sono state eseguite più prove in diversi punti della superficie per i motivi sopracitati per l'angolo di contatto statico.

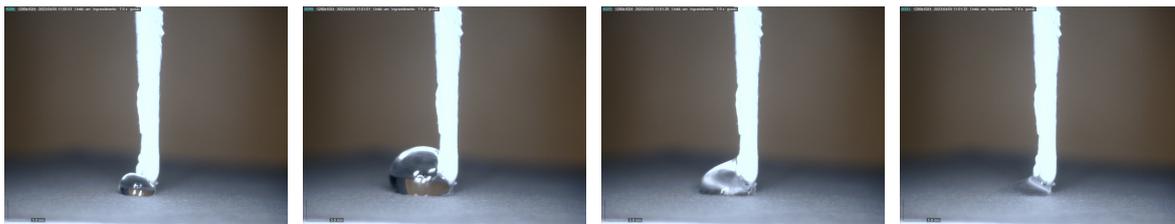
Si riportano di seguito i risultati per la superficie elettrofilata con portata di soluzione di 1,7 ml/h.



*Fig. 4.22 – Prova numero 1 per la superficie elettrofilata con portata di soluzione di 1,7 ml/h*



*Fig. 4.23 – Prova numero 2 per la superficie elettrofilata con portata di soluzione di 1,7 ml/h*

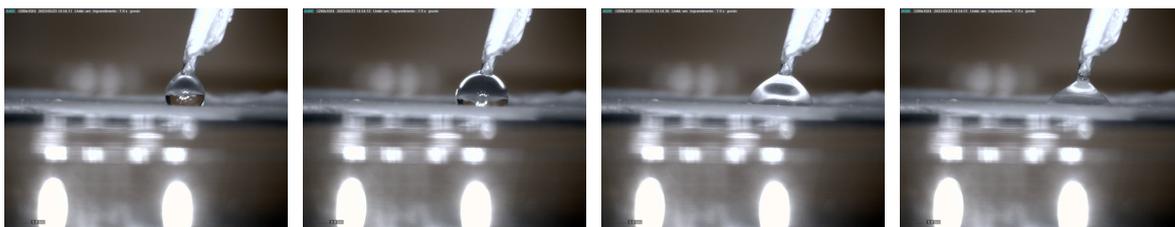


*Fig. 4.24 – Prova numero 3 per la superficie elettrofilata con portata di soluzione di 1,7 ml/h*

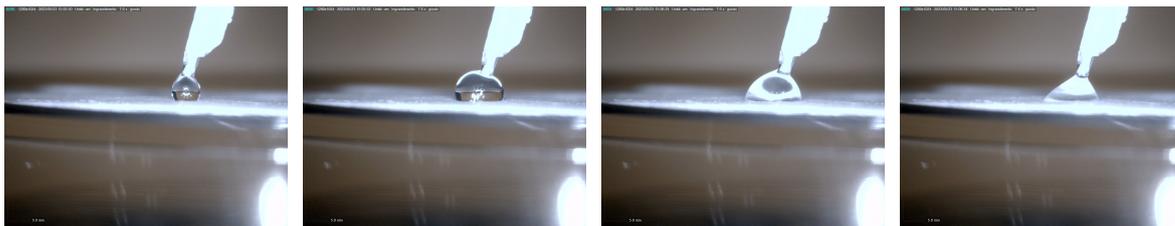
Dalle misurazioni effettuate con software CAD con modalità analoghe a quelle utilizzate per la misura dell'angolo di contatto statico l'isteresi dell'angolo di contatto media risulta di  $76^\circ$ . Il valore elevato dell'isteresi è coerente con il risultato ottenuto dalle misure dell'angolo di tilt, la differenza di pressione di Laplace tra la parte anteriore e posteriore della goccia risulta sufficiente a equilibrare la forza peso e la goccia non scivola.

Si è osservato come la goccia appena poggiata sulla superficie passi quasi istantaneamente allo stato di Wenzel, a questo comportamento è attribuibile la causa dell'elevato valore dell'isteresi dell'angolo di contatto.

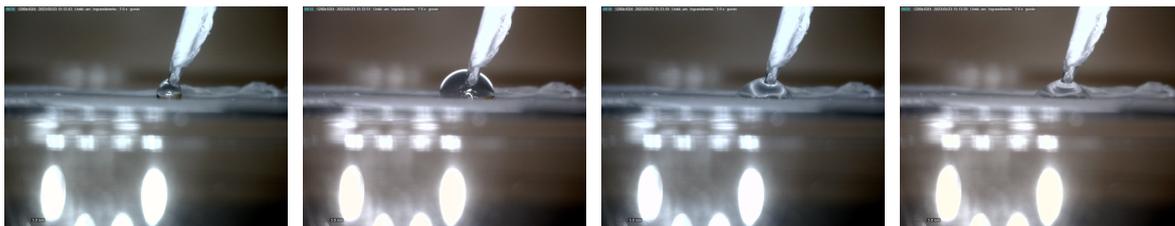
È stata poi misurata l'isteresi dell'angolo di contatto per la superficie elettrofilata con portata di soluzione pari a 1,2 ml/h.



*Fig. 4.25 – Prova numero 1 per la superficie elettrofilata con portata di soluzione di 1,2 ml/h*



*Fig. 4.26 – Prova numero 2 per la superficie elettrofilata con portata di soluzione di 1,2 ml/h*



*Fig. 4.27 – Prova numero 3 per la superficie elettrofilata con portata di soluzione di 1,2 ml/h*

Dalla media delle tre misure risulta una differenza tra angolo di avanzamento e di recessione di  $48^\circ$ , seppur presenti un valore minore rispetto alla prima superficie è pur sempre un valore molto elevato. Si assiste sempre all'instaurazione dello stato di Wenzel in pochi istanti dal momento del contatto della goccia con la superficie, ne consegue il valore elevato dell'isteresi dell'angolo di contatto.

## **5 Analisi del coefficiente di momento di una superficie SH**

### **5.1 Preparazione dei provini per il reometro**

Sono stati analizzati 5 provini, il primo è stato il disco in alluminio con la superficie inferiore rettificata che è stato utilizzato come riferimento per valutare l'efficacia dei rivestimenti. Il secondo provino è quello in Fig. 3.10, il rivestimento è realizzato tramite elettrofilatura direttamente sul disco, senza utilizzo di adesivo, utilizzando una portata di soluzione pari a 1,7 ml/h.

Ai provini nelle figure 5.30, 5.31 e 5.32 è stato applicato un rivestimento elettrofilato per la cui realizzazione è stata adottata una portata di soluzione pari a 1,2 ml/h per i problemi all'attrezzatura citati in precedenza. È stato prima applicato del nastro biadesivo sul film di materiale elettrofilato, dopodichè è stato fatto aderire ai dischi del reometro puliti con l'acetone per garantire una buona adesione. Infine con un bisturi il materiale in eccesso è stato tagliato ponendo attenzione ad ottenere un bordo il più regolare possibile e non sporgente rispetto al disco.

### **5.2 Analisi del coefficiente di momento**

Per l'analisi del coefficiente di momento è stato utilizzato un reometro a piatti paralleli: lo strumento è costituito da un piatto fisso e un piatto mobile supportato da un cuscinetto ad aria compressa che viene messo in rotazione da un motore che impone una certa velocità angolare, tra i due dischi viene interposto il liquido di cui si vuole misurare la viscosità. I due dischi sono in alluminio e sono rettificati. Lo strumento misura la coppia necessaria a mantenere una certa velocità di rotazione da cui si può risalire alla viscosità del fluido.

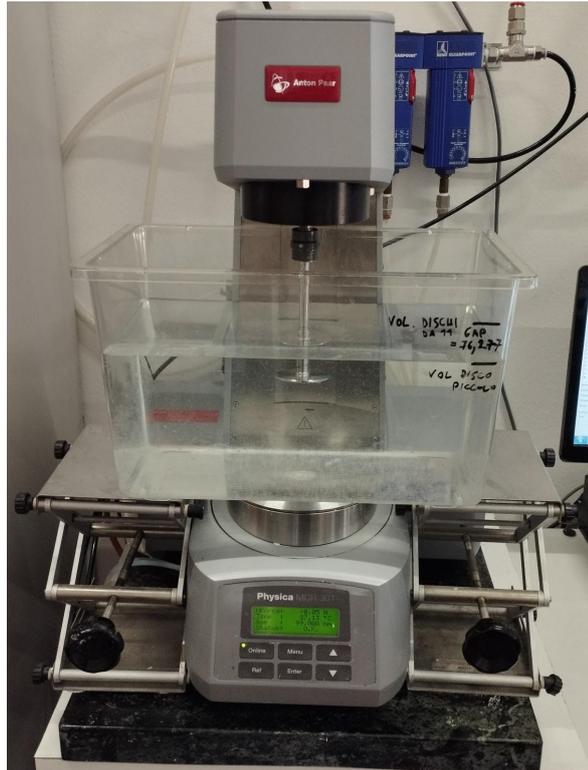


Fig. 5.28 – Reometro a piatti paralleli

Utilizzando come fluido l'acqua di cui la viscosità è nota è possibile utilizzare la misura di coppia fornita dallo strumento per calcolare il coefficiente di momento associato ai diversi rivestimenti applicati al disco mobile.

È stato utilizzato un contenitore rettangolare di dimensioni notevolmente maggiori rispetto al diametro del disco per non risentire degli effetti di bordo nella misura, il disco mobile è stato posto circa  $4\text{cm}$  sotto il pelo libero prestando attenzione a immergerlo in modo da non avere la presenza di bolle d'aria sulla sua faccia inferiore. Il reometro è collegato a un computer che tramite un software permette la definizione della procedura di prova e l'acquisizione dati, la procedura di prova utilizzata prevede una velocità di rotazione che va da 0 a 1000 rpm divisa in 100 step in cui viene misurata la coppia. Velocità angolare e coppia, indicate rispettivamente con  $\omega$  e  $M$ , vengono adimensionalizzate utilizzando due coefficienti: il numero di Reynolds e il coefficiente di momento di cui vengono riportate di seguito le rispettive formule

$$Re = \frac{\omega R^2}{\nu} = \frac{\rho \omega R^2}{\mu} \quad (5.7)$$

$$C_m = \frac{4M}{\rho R^5 \omega^2} \quad (5.8)$$

dove  $R$  è il raggio del disco, pari a  $2,5\text{cm}$ ,  $\rho = 997\text{kg/m}^3$  è la densità dell'acqua,  $\mu = 8,9 \cdot 10^{-4} \text{Pa s}$  è la viscosità dinamica dell'acqua a  $20^\circ\text{C}$ . Si riportano i valori del coefficiente di momento al variare del numero di Reynolds sul grafico in Fig. 5.29.

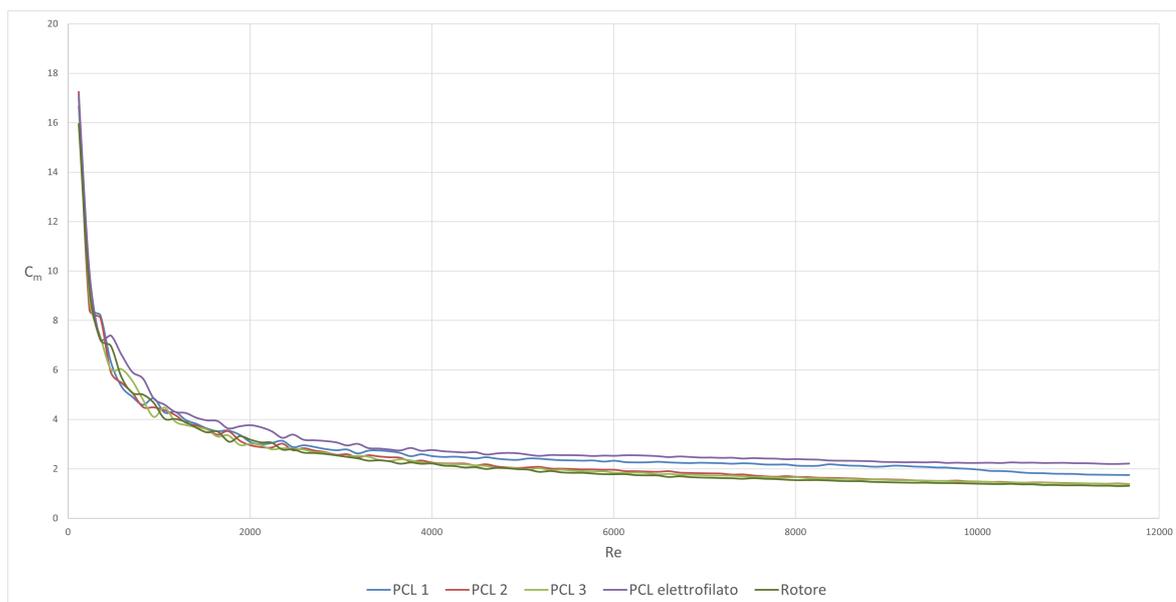


Fig. 5.29 – Curve del coefficiente di momento al variare del numero di Reynolds relative alle superfici SH

Le varie prove sono riassunte e descritte in Tab. 5.1.

Tab. 5.1 – Descrizione della legenda di Fig. 5.29

Legenda	Descrizione
Rotore	Disco di alluminio rettificato, pulito con acetone prima della prova
PCL elettrofilato	Disco su cui è stata effettuata l'elettrofilatura direttamente sopra, senza uso di adesivo, Fig. 3.10
PCL 1	Disco in Fig. 5.30, il rivestimento elettrofilato è stato applicato tramite incollaggio
PCL 2	Disco in Fig. 5.31, il rivestimento elettrofilato è stato applicato tramite incollaggio
PCL 3	Disco in Fig. 5.32, il rivestimento elettrofilato è stato applicato tramite incollaggio

Si osserva come per numeri di Reynolds minori di 2500 ci siano intervalli in cui i dischi a cui è applicato il film elettrofilato presentano un coefficiente di momento leggermente inferiore rispetto a quello non trattato, tuttavia con un andamento irregolare; mentre per numeri di

Reynolds superiori a 2500 la curva relativa al disco non trattato è sempre inferiore alle altre curve.

La curva "PCL elettrofilato" è quella che presenta un coefficiente di momento più alto, ciò è attribuibile alla scarsa adesione del film elettrofilato al disco che ha portato al distacco del film lungo i bordi del disco.



*Fig. 5.30 – PCL 1, rivestimento elettrofilato applicato tramite incollaggio*

Si nota come il disco in Fig. 5.30 presenti delle bolle d'aria piuttosto pronunciate al di sotto dello strato di adesivo a causa di una applicazione non precisa. Inoltre in una parte di bordo non è presente l'adesivo. Queste imperfezioni si riflettono sul coefficiente di momento che risulta significativamente più alto rispetto agli altri dischi.



*Fig. 5.31 – PCL 2, rivestimento elettrofilato applicato tramite incollaggio*

Questo secondo provino (Fig. 5.31) presenta sempre delle bolle d'aria al di sotto dell'adesivo, tuttavia sono meno pronunciate, infatti l'andamento del coefficiente di momento risulta simile al provino PCL 3.



*Fig. 5.32 – PCL 3, rivestimento elettrofilato applicato tramite incollaggio*

Il terzo provino (Fig. 5.32) presenta invece un'applicazione praticamente perfetta, senza bolle d'aria: l'andamento del coefficiente di momento risulta comparabile al disco in alluminio rettificato non rivestito.

Da questi risultati si nota come la modalità e l'accuratezza dell'applicazione del rivestimento ricoprono un ruolo fondamentale nella riduzione del coefficiente di momento. Va osservato come lo spessore aumentato dei dischi rivestiti, in combinazione con le eventuali piccole imperfezioni in corrispondenza del bordo del rivestimento potrebbero aver avuto un effetto peggiorativo sul coefficiente di momento.

Da queste prove si può concludere come le due superfici elettrofilate analizzate, sia per la loro morfologia che per il materiale di cui sono costituite, portino rapidamente alla transizione dallo stato di Cassie-Baxter allo stato di Wenzel e ciò penalizza le prestazioni dei rivestimenti.

## 6 Realizzazione di una LIS

Una LIS è costituita da un lubrificante stabilizzato in una superficie porosa dalle forze capillari, durante l'esperienza in laboratorio sono state realizzate tre diverse LIS, tutte utilizzando la stessa superficie ma diversi lubrificanti.

È stata utilizzata una superficie elettrofilata adottando i parametri di processo descritti nel capitolo 3, con portata di polimero pari a 1,2 ml/h.

Dopodiché è stata impregnata di tre diversi lubrificanti:

- Olio di silicone avente viscosità pari a 20 cSt
- Olio di silicone avente viscosità pari a 500 cSt
- Olio di vaselina avente viscosità pari a 35 cSt

Le superfici sono state impregnate facendo cadere delle gocce d'olio su di esse, sono stati osservati diversi comportamenti a seconda dell'impregnante utilizzato: l'olio di silicone a viscosità minore e l'olio di vaselina sono stati assorbiti in pochi istanti dalla superficie mentre l'olio di silicone a viscosità maggiore anche dopo un minuto dal contatto con la goccia presentava ancora dell'olio non assorbito sulla superficie che tuttavia col trascorrere di ancora qualche minuto è stato assorbito.

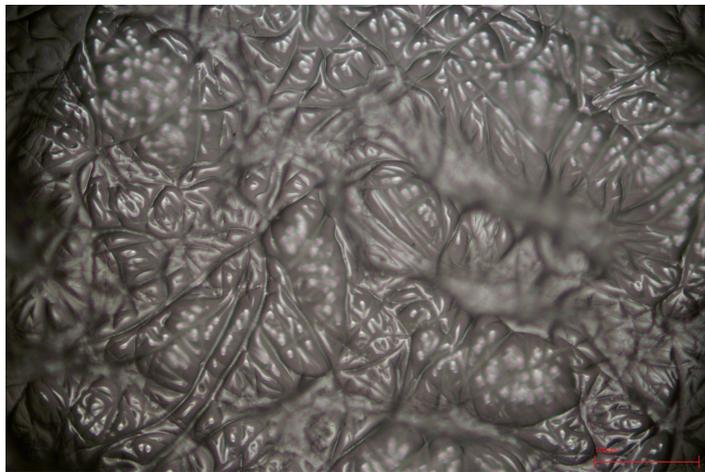
Le tre diverse LIS sono state osservate al microscopio ottico, utilizzando luce riflessa, è stato possibile acquisire un'immagine nitida con ingrandimenti fino a 200x, si riportano di seguito le immagini.



*Fig. 6.33 – LIS impregnata con olio di silicone 20 cSt 50x*



*Fig. 6.34 – LIS impregnata con olio di silicone 20 cSt 100x*

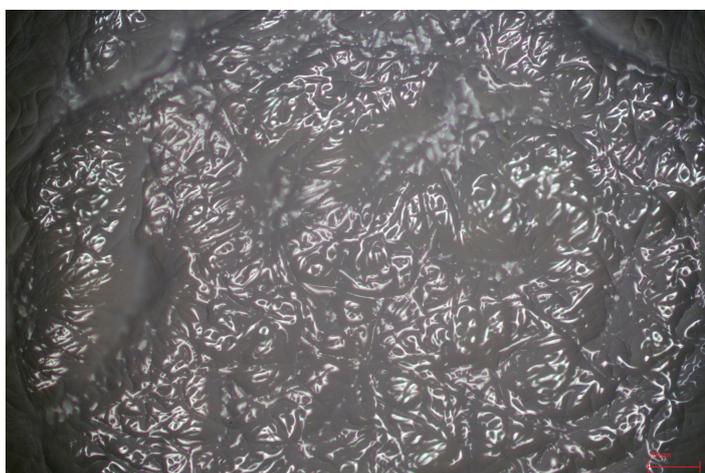


*Fig. 6.35 – LIS impregnata con olio di silicone 20 cSt 200x*

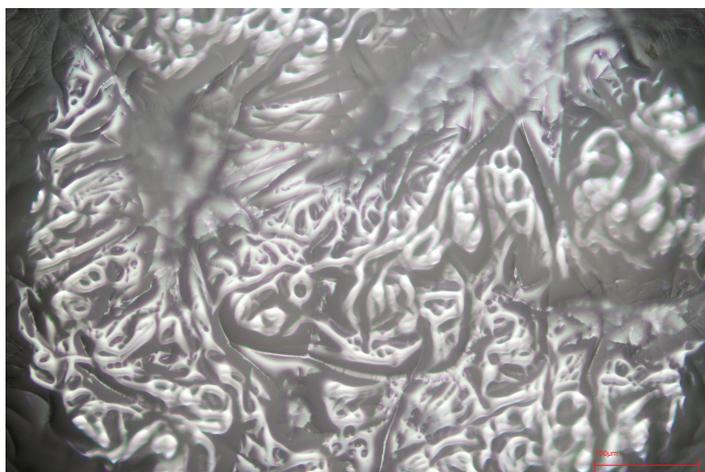
Dalla Fig. 6.33, Fig. 6.34 e Fig. 6.35 si nota come il solido non sia totalmente sommerso dall'olio, è ancora distinguibile chiaramente la disposizione delle fibre superficiali.



*Fig. 6.36 – LIS impregnata con olio di silicone 500 cSt 50x*

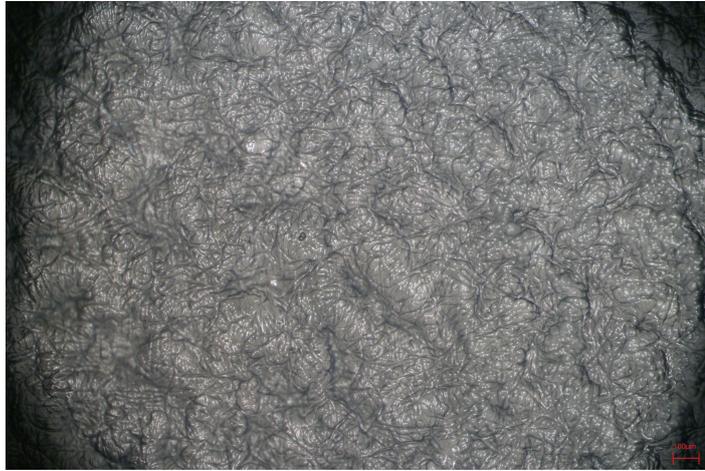


*Fig. 6.37 – LIS impregnata con olio di silicone 500 cSt 100x*

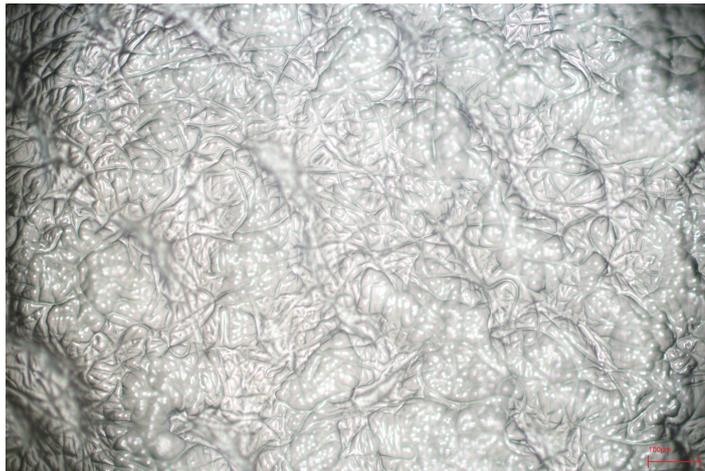


*Fig. 6.38 – LIS impregnata con olio di silicone 500 cSt 200x*

In Fig. 6.36, Fig. 6.37 e Fig. 6.38 le fibre sono meno distinguibili e l'olio tende a coprire di più la superficie rispetto all'olio di silicone a viscosità minore.



*Fig. 6.39 – LIS impregnata con olio di vaselina 50x*



*Fig. 6.40 – LIS impregnata con olio di vaselina 100x*



*Fig. 6.41 – LIS impregnata con olio di vaselina 200x*

Da Fig. 6.39, Fig. 6.40 e Fig. 6.41 si nota come la frazione di solido emerso sia maggiore rispetto alla LIS impregnata con olio di silicone 500 cSt e simile alla LIS impregnata con olio di silicone 20 cSt.

## 7 Misure degli angoli di contatto per la LIS

### 7.1 Misura dell'angolo di contatto statico

L'apparato sperimentale è lo stesso utilizzato per la misura dell'angolo di contatto statico della superficie SH, sono state effettuate più misure per tenere in conto le possibili variazioni tra punti diversi della superficie. Inoltre il film impregnato di olio è stato posto su un vetrino per garantirne la planarità. Si riportano di seguito i risultati delle misure, catalogati in base al tipo di impregnante utilizzato.

#### 7.1.1 Olio di silicone 20 cSt

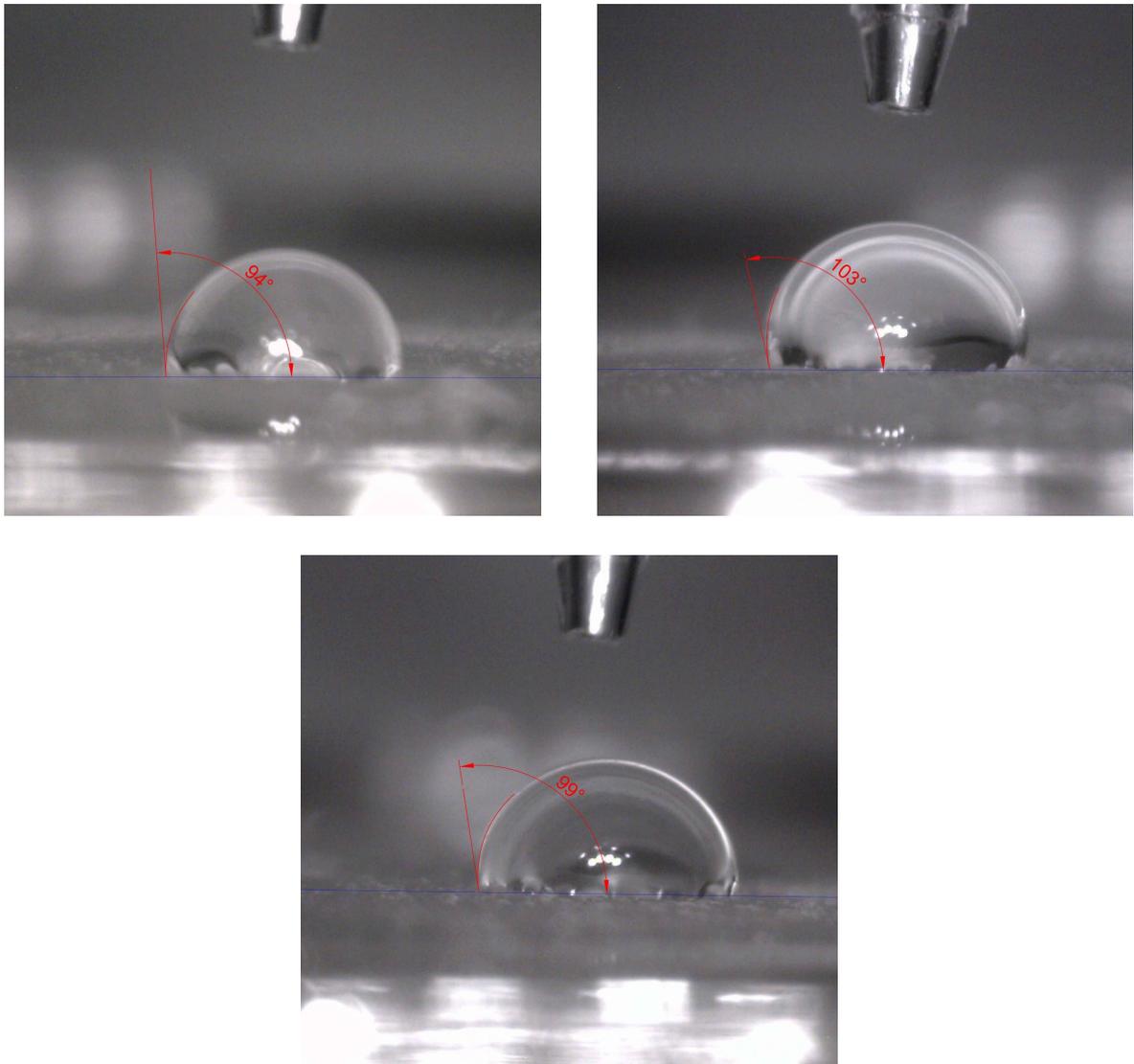
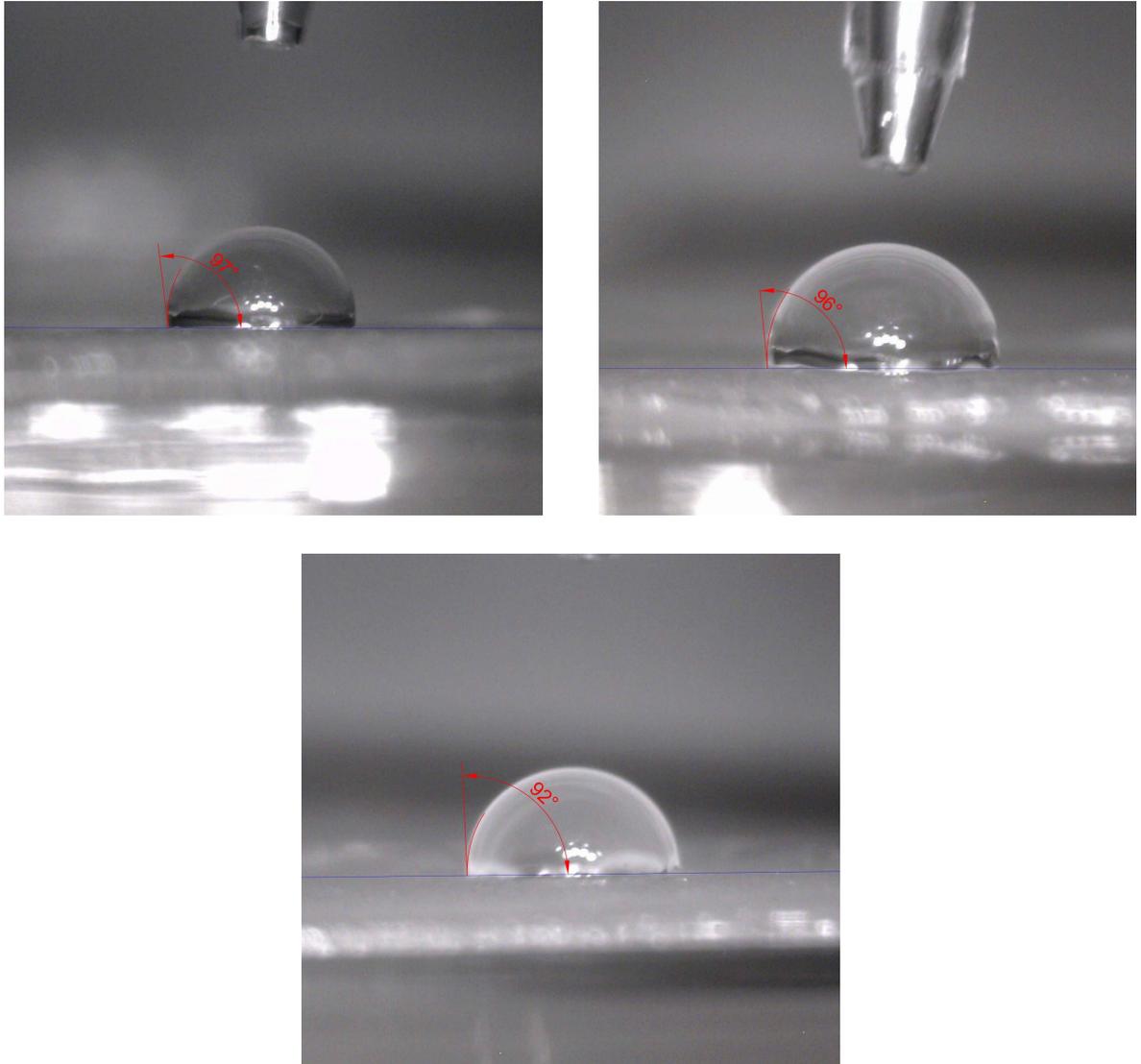


Fig. 7.42 – Misure dell'angolo di contatto per una LIS impregnata con olio di silicone 20 cSt

Dalla media delle tre misure risulta un angolo di contatto statico  $\alpha = 99^\circ$ .

### 7.1.2 Olio di silicone 500 cSt



*Fig. 7.43 – Misure dell'angolo di contatto per una LIS impregnata con olio di silicone 500 cSt*

Dalla media delle tre misure risulta un angolo di contatto statico  $\alpha = 95^\circ$

### 7.1.3 Olio di vaselina

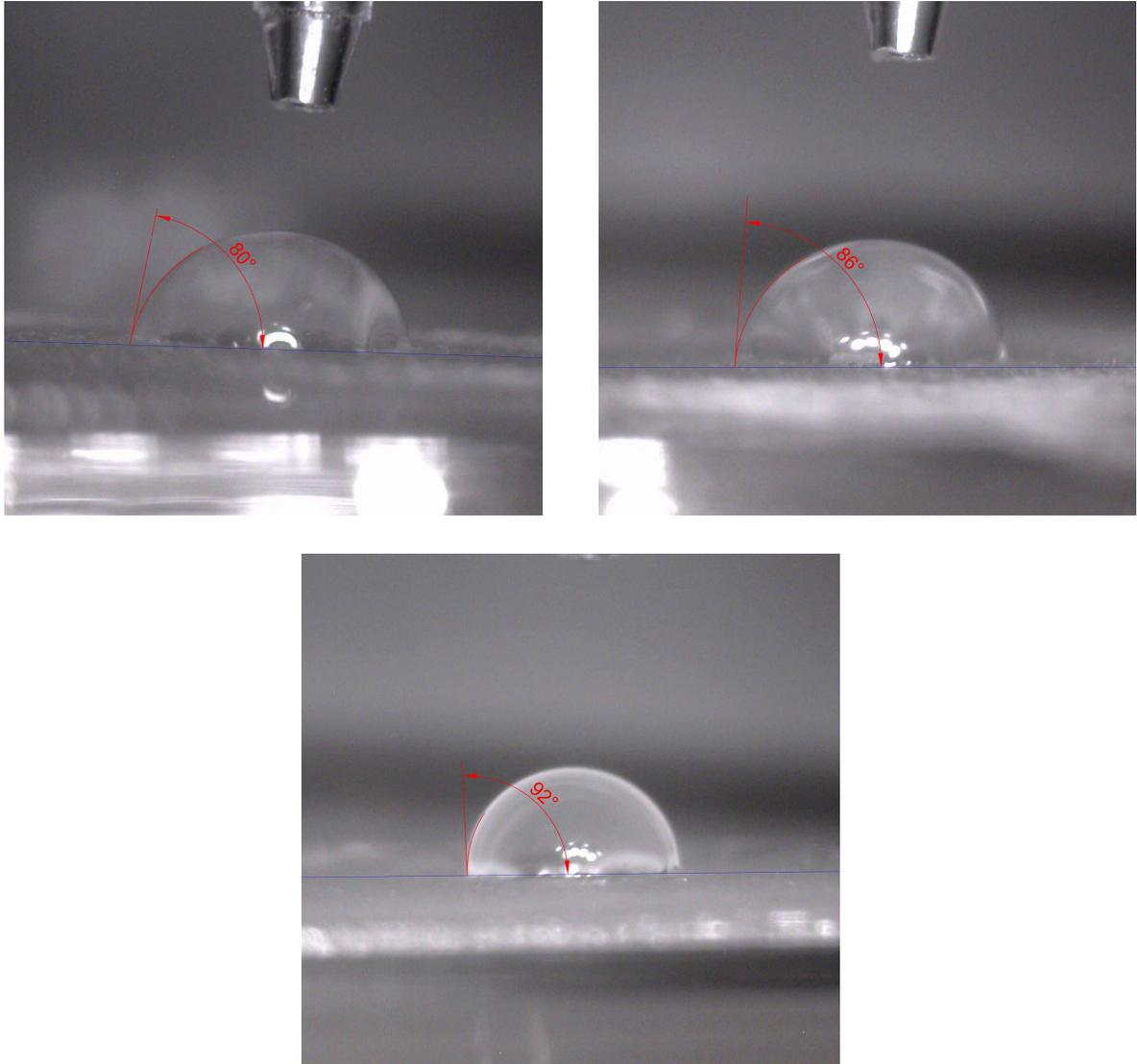


Fig. 7.44 – Misure dell'angolo di contatto per una LIS impregnata con olio di vaselina

Dalla media delle tre misure risulta un angolo di contatto statico  $\alpha = 80^\circ$ .

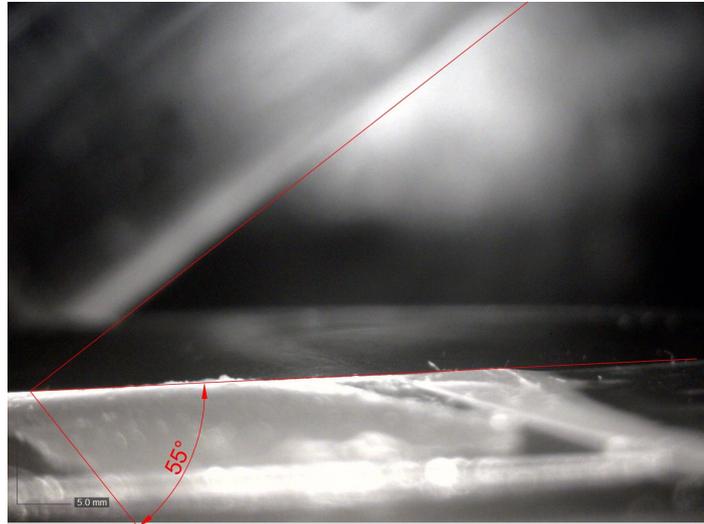
Le differenze nelle misure dell'angolo di contatto statico delle tre diverse superfici sono riconducibili soprattutto alle diverse energie di interfaccia tra l'olio e la goccia: le due superfici impregnate con olio di silicone presentano quindi un'altezza della cresta di olio simile e ciò si riflette sui simili valori dell'angolo di contatto, mentre l'olio di vaselina presenta una cresta di olio più alta e quindi un minore angolo di contatto misurato.

## 7.2 Misura dell'angolo di tilt

L'angolo di tilt è stato misurato per le tre superfici impregnate con i tre oli diversi. Come per la misura dell'angolo di contatto statico il film è stato posto su un vetrino per garantire una superficie il più possibile piatta. La misura è stata effettuata con software CAD utiliz-

zando come riferimento un cartoncino posto in verticale. I risultati sono catalogati in base al lubrificante di cui è impregnata la superficie.

### 7.2.1 Olio di silicone 20 cSt



*Fig. 7.45 – Angolo di tilt per LIS impregnata con olio di silicone 20cSt*

Quando la goccia posta sulla superficie ha cominciato a scivolare si è interrotta l'inclinazione della piattaforma di misura ed è stata acquisita l'immagine. Dalla misura risulta un angolo di tilt  $\theta = 55^\circ$ .

### 7.2.2 Olio di silicone 500 cSt



*Fig. 7.46 – Angolo di tilt per LIS impregnata con olio di silicone 500cSt*

In questo caso la goccia non scivola: l'angolo di tilt è superiore ai  $90^\circ$ . Si nota una discreta isteresi dell'angolo di contatto.

### 7.2.3 Olio di vaselina



Fig. 7.47 – Angolo di tilt per LIS impregnata con olio di vaselina

Anche in questo caso la goccia non scivola: l'angolo di tilt è superiore ai  $90^\circ$ .

## 7.3 Misura dell'angolo di avanzamento e recessione

Sono poi state effettuate le misure dell'angolo di avanzamento e dell'angolo di recessione con le stesse modalità descritte per la superficie SH, sia per quanto riguarda l'acquisizione delle immagini che per quanto riguarda la misura con software CAD. Per garantire la planarità la superficie è stata posta su un vetrino. I risultati sono catalogati in base al lubrificante di cui la superficie è impregnata.

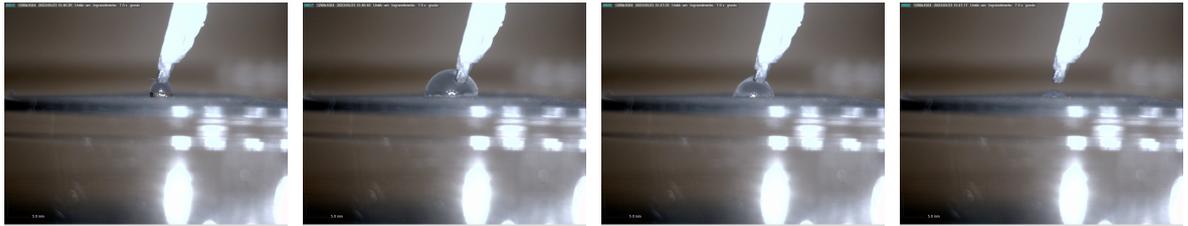
### 7.3.1 Olio di silicone 20 cSt



Fig. 7.48 – Isteresi dell'angolo di contatto per una LIS impregnata con olio di silicone 20 cSt

L'isteresi dell'angolo di contatto risulta di  $12^\circ$ . Questo risultato è coerente con il risultato ottenuto dalla misura dell'angolo di tilt: il basso valore dell'isteresi dell'angolo di contatto causa una minore differenza di pressione di Laplace tra la parte anteriore e posteriore della goccia che riesce a bilanciare la forza peso della goccia solo fino al raggiungimento dell'angolo  $\theta$ .

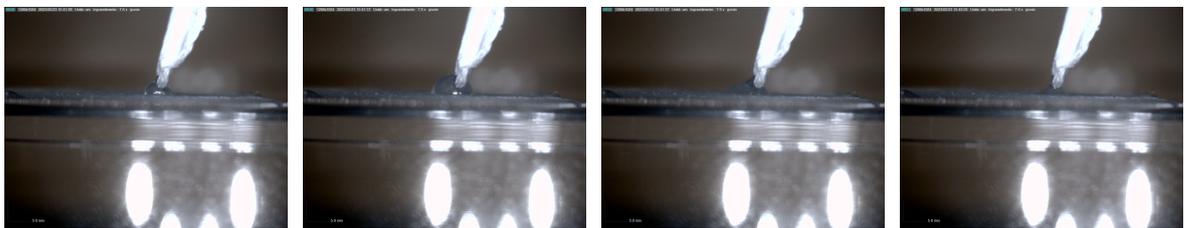
### 7.3.2 Olio di silicone 500 cSt



*Fig. 7.49 – Isteresi dell'angolo di contatto per una LIS impregnata con olio di silicone 500 cSt*

L'isteresi dell'angolo di contatto risulta di  $37^\circ$ . Questo valore è riconducibile alla diversa morfologia della superficie impregnata ma soprattutto alla diversa tensione di adesione del lubrificante sia con il solido che con la goccia.

### 7.3.3 Olio di vaselina

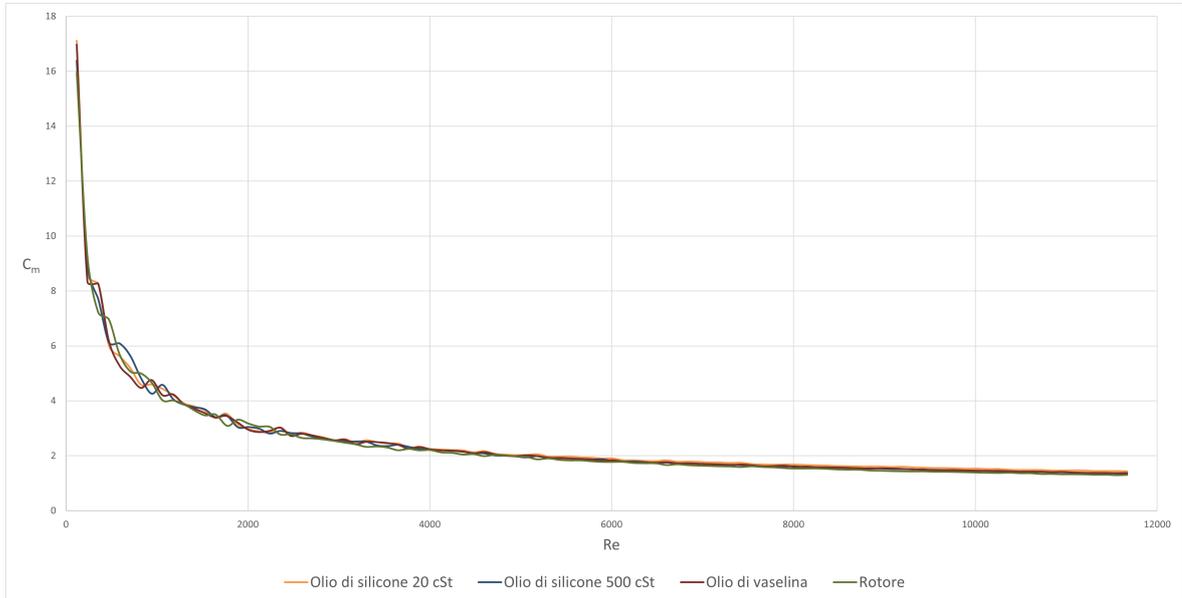


*Fig. 7.50 – Isteresi dell'angolo di contatto per una LIS impregnata con olio di vaselina*

L'isteresi dell'angolo di contatto risulta di  $23^\circ$ . Questo valore, seppur contenuto, non permette lo scivolamento della goccia sulla superficie. Dalla relativa misura dell'angolo di contatto statico si osserva come l'olio di vaselina presenti un valore di  $\alpha$  minore rispetto agli altri lubrificanti, la causa si può attribuire a un valore più elevato della tensione di adesione tra l'olio e l'acqua, che porta quindi a una maggiore altezza della cresta di olio e a una maggiore adesione della goccia alla superficie.

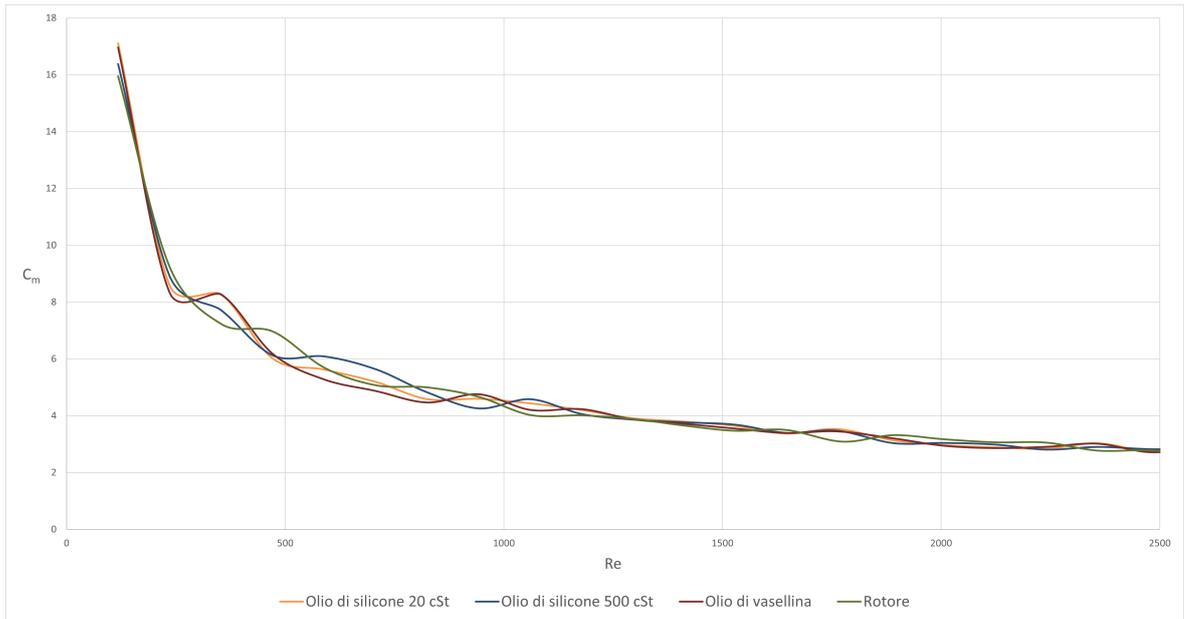
## 8 Analisi del coefficiente di momento di una LIS

Le prove sono state condotte con le stesse modalità e la stessa strumentazione adottate per le superfici SH. L'elaborazione dei dati è stata effettuata con Excel utilizzando le formule 5.7 e 5.8.



*Fig. 8.51 – Curve del coefficiente di momento al variare del numero di Reynolds relative alle LIS*

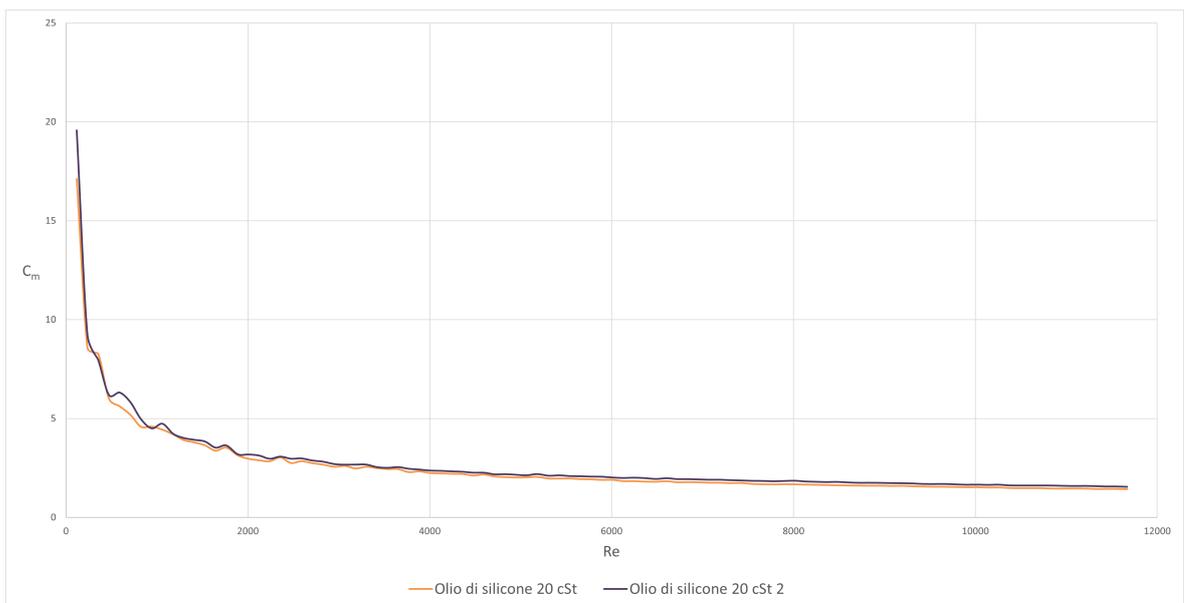
Per numeri di Reynolds inferiori a 2500, sono presenti zone in cui le curve relative alle LIS presentano un coefficiente di momento inferiore rispetto al rotore non trattato, tra queste spicca la LIS impregnata con olio di vaselina per numeri di Reynolds compresi tra 500 e 1000, tuttavia come per le superfici SH questo andamento si alterna a intervalli in cui il rotore non rivestito ha invece prestazioni migliori.



*Fig. 8.52 – Fig. 8.51 per valori di Reynolds inferiori a 2500*

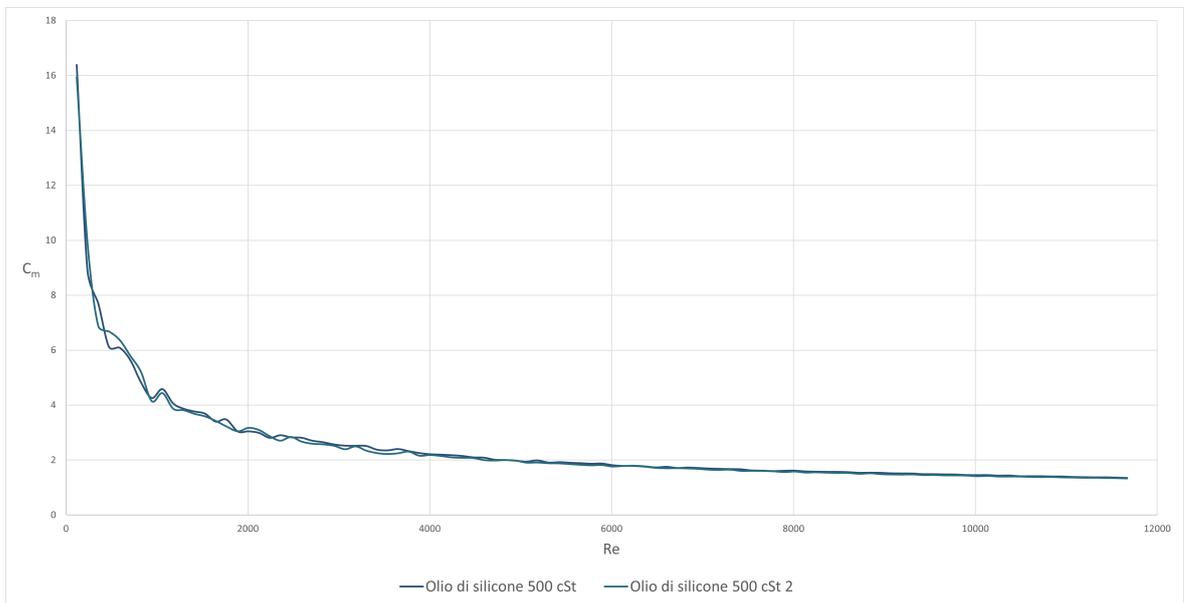
Si nota come le tre curve relative alle LIS, nonostante siano impregnate con lubrificanti diversi, siano quasi indistinguibili tra loro per valori di Reynolds superiori a 2500 e presentino tutte un coefficiente di momento leggermente superiore a quello del rotore di alluminio rettificato non rivestito per numeri di Reynolds elevati.

In seguito i tre dischi sono stati immersi in acqua per una settimana, per valutare se ci fossero variazioni nelle prestazioni delle superfici. Si riportano di seguito le curve del coefficiente di momento, le curve indicate col numero 2 fanno riferimento al disco rimasto immerso per una settimana.



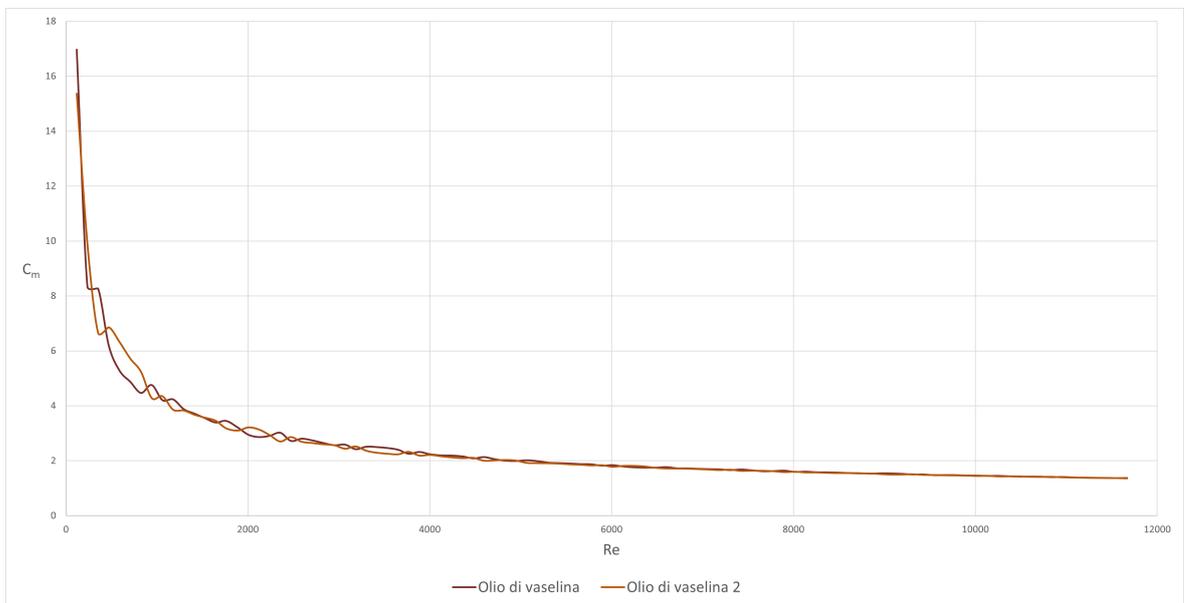
*Fig. 8.53 – Confronto delle curve del coefficiente di momento per la LIS impregnata con olio di silicone 20 cSt dopo una settimana di immersione*

Si nota come la curva relativa al disco rimasto immerso per una settimana in Fig. 8.53 presenti un coefficiente di momento lievemente superiore, tuttavia la differenza è minima.



*Fig. 8.54 – Confronto delle curve del coefficiente di momento per la LIS impregnata con olio di silicone 500 cSt dopo una settimana di immersione*

In Fig. 8.54 la curva relativa al disco rimasto immerso non presenta delle variazioni significative rispetto alla curva relativa allo stesso disco misurato una settimana prima.



*Fig. 8.55 – Confronto delle curve del coefficiente di momento per la LIS impregnata con olio di vaselina dopo una settimana di immersione*

Come per il caso precedente le due curve in Fig. 8.55 sono comparabili e non presentano differenze significative tra di loro.

## 9 Conclusioni

Per quanto riguarda le superfici superidrofobiche studiate l'instaurazione dello stato di Wenzel, a causa della combinazione di morfologia e polimero utilizzati per la loro realizzazione, avviene in tempi molto brevi; a tal proposito potrebbe essere interessante studiare l'idrofobicità di superfici elettrofilate utilizzando polimeri con una minore tensione di adesione in modo da posticipare la transizione allo stato di Wenzel.

Dalle misure effettuate sulle LIS, in particolare per la superficie impregnata con l'olio di silicone avente viscosità pari a 20 cSt si è ottenuto un basso valore dell'isteresi dell'angolo di contatto che ha permesso alla goccia di scivolare sul piano inclinato. Rispetto agli altri oli è quello che presenta i migliori valori degli angoli di contatto e quindi minore energia di interfaccia con l'acqua, tuttavia è l'unico lubrificante che ha portato a un leggero peggioramento del coefficiente di momento a seguito di una settimana di immersione. La stabilità del lubrificante nella superficie elettrofilata potrebbe essere migliorata studiando diverse combinazioni di polimero e morfologia superficiale. Inoltre, dato che l'adesione della goccia alla superficie è influenzata anche dalla composizione chimica del solido, lo studio di LIS elettrofilate con polimeri aventi minore tensione di adesione potrebbe portare a risultati migliori. Le LIS studiate, nonostante non presentino un significativo miglioramento nel coefficiente di momento rispetto al disco di alluminio rettificato in tutto l'intervallo di valori di Reynolds analizzati, presentano alcune zone in cui il coefficiente di momento è invece leggermente inferiore per bassi valori di numeri di Reynolds. Inoltre, presentando un'elevata trasparenza alla luce, può essere studiata l'applicazione di queste superfici sui pannelli solari per favorire la rimozione dello sporco da parte dell'acqua, evitando riduzioni dell'efficienza e riducendo i costi di manutenzione. Si è osservata tuttavia un'eccessiva diffusione della luce passante attraverso la LIS e ciò non permetterebbe l'utilizzo sui parabrezza o su altre superfici attraverso cui vi è necessità di vedere nitidamente; a questo problema si potrebbe ovviare utilizzando un film elettrofilato di spessore minore riducendo la durata del processo di elettrofilatura. Va notato che in queste applicazioni è fondamentale che anche l'adesivo presenti queste proprietà.

## Bibliografia

- [1] A.J.B. Milne; A. Amirfazli. “The Cassie equation: How it is meant to be used”. In: *Advances in Colloid and Interface Science* 170 (2011), pp. 48–55.
- [2] H.B. Eral; D.J.C.M. ’t Mannetje; J.M. Oh. “Contact Angle Hysteresis: a Review of Fundamentals and Applications.” In: *Colloid Polymer Science* 291.2 (2013), pp. 247–270.
- [3] A. Bottaro. “Superhydrophobic surfaces for drag reduction”. In: *Istituto Lombardo (Rend. Scienze)* 148 (2014), pp. 239–268.
- [4] Brian R. Solomon; Srinivas Bengaluru Subramanyam; Taylor A. Farnham; Karim S. Khalil; Sushant Anand; Kripa K. Varanasi. *Non-wettable Surfaces: Theory, Preparation, and Applications*. Royal Society of Chemistry, 2016, pp. 285–318.
- [5] Yunus A. Cengel; John M. Cimbala. *Fluid Mechanics Fundamentals and Applications*. McGraw-Hill Education, 2018.
- [6] Tommi Huhtamäki; Xuelin Tian; Juuso T. Korhonen; Robin H. A. Ras. “Surface-wetting characterization using contact-angle measurements”. In: *Natura Protocols* 13 (2018), pp. 1521–1538.
- [7] Sam Peppou-Chapman, Christopher Vega-Sánchez e Chiara Neto. “Detection of Nanobubbles on Lubricant-Infused Surfaces Using AFM Meniscus Force Measurements”. In: *Langmuir* 38.33 (2022), pp. 10234–10243.
- [8] Hardt; Steffen e McHale; Glen. “Flow and Drop Transport Along Liquid-Infused Surfaces”. In: *Annual Review of Fluid Mechanics* 54.1 (2022), pp. 83–104.

# Simbologia

## Simboli

$\gamma_{SG}$	Energia di interfaccia tra solido e gas
$\gamma_{LS}$	Energia di interfaccia tra liquido e solido
$\gamma_{LG}$	Energia di interfaccia tra liquido e gas
$\gamma$	Tensione superficiale
$\alpha$	Angolo di contatto
$A$	Tensione di adesione
$r$	Fattore di rugosità
$\alpha_W$	Angolo di contatto per lo stato di Wenzel
$\Delta\alpha$	Isteresi dell'angolo di contatto
$\alpha_a$	Angolo di avanzamento
$\alpha_r$	Angolo di recessione
$\alpha_F$	Angolo di contatto per lo stato di Cassie-Baxter
$A_E$	Tensione di adesione per una LIS con solido che emerge
$\gamma_{OS}$	Energia di interfaccia tra lubrificante e solido
$\gamma_{OL}$	Energia di interfaccia tra lubrificante e liquido di lavoro
$A_S$	Tensione di adesione per una LIS con solido sommerso
$\theta$	Angolo di tilt
$Re$	Numero di Reynolds
$C_m$	Coefficiente di momento
$M$	Coppia
$\omega$	Velocità angolare
$R$	Raggio del disco del reometro
$\rho$	Densità dell'acqua
$\nu$	Viscosità cinematica dell'acqua
$\mu$	Viscosità dinamica dell'acqua

## Abbreviazioni

PCL	Policaprolattone
SH	Superidrofobica
LIS	Lubricant-impregnated surface