

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI GENOVA

SCUOLA POLITECNICA

DIME

Dipartimento di Ingegneria Meccanica, Energetica

Gestionale e dei Trasporti



TESI DI LAUREA TRIENNALE IN

INGEGNERIA MECCANICA

**Analisi del moto su superfici  
superidrofobiche**

Allieva

**Giulia Innocenti**

Supervisore

Ch.mo Prof. Alessandro Bottaro

Co-Supervisore

Dr. Alberto Lagazzo

Ottobre 2020

Alla mia famiglia,  
a Ercole,  
a chi mi è stato vicino.

G.I.

# Prefazione

I materiali e i mezzi superidrofobici sono studiati per la loro proprietà di minimizzare le interazioni solido-liquido.

L'attenzione e l'osservazione dei fenomeni legati alla superidrofobicità vede le sue radici nel mondo animale e vegetale, dove vi sono svariati esempi di come la natura si è adattata e migliorata al fine di creare superfici quasi totalmente repellenti all'acqua.

Aspetto fondamentale è il mantenimento di uno strato di gas tra le microscopiche asperità superficiali del solido e il liquido sovrastante, al fine di permettere lo scorrimento del liquido sulla parete e una conseguente riduzione dell'attrito.

La seguente trattazione vuole fornire un'analisi dell'interazione del moto di un fluido (acqua) su superficie superidrofobica, simulata imponendo precise condizioni al contorno.

È inoltre oggetto di studio lo sviluppo di analisi sperimentali, svolte in laboratorio, che mirano alla valutazione delle prestazioni del materiale superidrofobico sia in termini di grandezze caratteristiche che di coefficienti legati all'attrito.

## Abstract

Superhydrophobic materials are studied for their property of minimizing solid-liquid interactions.

Initial observations of superhydrophobic behaviour were made in the plants and animals kingdoms, since Nature adapts and improves over time in order to attain *optimal* properties, such as, for example, a surface which is almost totally repellent to water.

A fundamental requirement to maintain superhydrophobicity is the existence of a layer of gas (a *plastron*) between the microscopic surface roughness of the solid and the liquid, which permits a smooth flow of the liquid on the wall with reduced friction.

This thesis aims to provide an analysis of the interaction between a fluid (water) and a superhydrophobic surface, simulated by imposing precise boundary conditions.

The development of experimental analyzes, carried out in the laboratory, aimed at evaluating the performance of the superhydrophobic material, both in terms of characteristic quantities and coefficients related to friction, is also subject to verification.

# Ringraziamenti

Ringrazio il Prof. Bottaro per avermi dato l'opportunità di svolgere questa tesi che mi ha insegnato tanto, per avermi seguita con costanza e per la sua infinita disponibilità e tempestività nel rispondere ad ogni mia richiesta.

Un sentito ringraziamento va al Dott. Lagazzo che mi ha aiutato durante le attività condotte in laboratorio e che con pazienza mi ha permesso di conoscere l'affascinante mondo della sperimentazione.

Grazie alla Dott. Delucchi e al Prof. Boragno per i loro consigli e le loro preziose osservazioni e a Sahrish Batool Naqvi per i suggerimenti pratici di grande aiuto durante l'elaborazione della tesi.

Uno speciale ringraziamento va alla mia famiglia.

Alla mia mamma, Nadia, capace di credere in me più di chiunque altro.

Al mio papà, Stefano, da sempre il mio più grande sostenitore.

Ai miei quasi fratelli, Chiara e Luca, che hanno saputo darmi la carica nei momenti di sconforto.

Ai miei zii, Marina e Daniele, che da sempre mi sono accanto in ogni mio percorso.

Ai miei zii, Bruna e Paolo, e a mia cugina Sara per avermi supportata in ogni occasione.

A tutti i miei familiari e a chi mi è stato accanto per avermi fatto sentire importante, amata e sostenuta.

Grazie ai miei amici, agli amici storici e agli amici incontrati da poco, ai compagni di studio e ai compagni di avventure, ognuno a modo suo mi è stato accanto e sarebbe stato più difficile senza di voi.

Ringrazio con tutto il mio cuore Ercole che, tenendomi per mano, ha gioito per i miei successi e mi è stato accanto nei momenti difficili, mi ha guidata con i suoi consigli e mi ha sempre fatto capire quanto sia fiero di me. È tutto più speciale con te al mio fianco.

Grazie al mio angelo custode, la mia nonna Silvana, che mi ha trasmesso l'amore per lo studio, la passione nel raggiungere i propri obiettivi e l'umiltà. Anche a lei dedico questa tesi, a lei che non ha avuto i mezzi per inseguire il sogno di studiare, ma che grazie alla sua curiosità e alla sua intelligenza è sempre riuscita a volare in alto.

# Indice

<b>Simbologia</b>	<b>1</b>
<b>1 Introduzione</b>	<b>3</b>
<b>2 Studio della letteratura</b>	<b>4</b>
2.1 Aspetti generali . . . . .	4
2.2 Accenno alla biomimetica . . . . .	7
2.3 Realizzazione superfici SH . . . . .	9
2.4 Tecnologie ed applicazioni . . . . .	10
<b>3 Formulazione matematica</b>	<b>11</b>
3.1 Equazioni iniziali, continuità e quantità di moto . . . . .	11
3.2 Sviluppi asintotici equazioni caso micro . . . . .	14
3.2.1 Sviluppo asintotico delle variabili . . . . .	14
3.2.2 Equazioni riscritte con sviluppi asintotici . . . . .	14
3.2.3 Sforzi Tangenziali e Normali . . . . .	15
3.3 Risoluzione del problema all'ordine principale $\mathcal{O}(\epsilon^0)$ . . . . .	18
3.4 Risoluzione del problema al primo ordine $\mathcal{O}(\epsilon^1)$ . . . . .	21
3.5 Sviluppo dettagliato dei nove problemi $\mathcal{O}(\epsilon)$ . . . . .	23
<b>4 Il metodo agli elementi finiti e FreeFEM++</b>	<b>27</b>
4.1 Richiami sugli spazi funzionali lineari . . . . .	27
4.2 Metodi variazionali . . . . .	29
4.2.1 Il metodo di Galerkin . . . . .	29
4.2.2 Formulazioni deboli . . . . .	30
4.3 Il metodo degli elementi finiti . . . . .	31
4.3.1 Elementi finiti mono-dimensionali . . . . .	31
4.3.2 Elementi finiti triangolari . . . . .	32
4.4 FreeFEM++ . . . . .	34
<b>5 Problema bidimensionale</b>	<b>35</b>
5.1 Risoluzione del problema all'ordine principale $\mathcal{O}(\epsilon^0)$ . . . . .	35
5.2 Risoluzione del problema al primo ordine $\mathcal{O}(\epsilon^1)$ . . . . .	37
<b>6 Problema tridimensionale</b>	<b>42</b>
6.1 Creazione della geometria e della mesh . . . . .	42
6.2 Caso 1: pilastrino . . . . .	45
6.2.1 Ipotesi . . . . .	45
6.2.2 Analisi dei risultati . . . . .	46
6.3 Caso 2: cavità . . . . .	48
6.3.1 Ipotesi . . . . .	48
6.3.2 Analisi dei risultati . . . . .	49
<b>7 Qualche esperienza di laboratorio</b>	<b>51</b>

7.1	Realizzazione dischetti superidrofobici . . . . .	51
7.2	Misure dell'angolo di contatto statico . . . . .	53
7.3	Misure dell'angolo di tilt . . . . .	58
7.4	Analisi morfologica del dischetto . . . . .	60
	7.4.1 Microscopio ottico . . . . .	60
	7.4.2 Microscopio elettronico . . . . .	63
7.5	Analisi del coefficiente di momento: il reometro . . . . .	67
<b>8</b>	<b>Conclusioni</b>	<b>72</b>

# Simbologia

## Simboli

$\alpha$ . . . . .	Angolo di contatto
$\gamma$ . . . . .	Tensione superficiale
$A$ . . . . .	Tensione di adesione
$r$ . . . . .	Fattore di rugosità
$\hat{t}$ . . . . .	Variabile di tempo
$\hat{\mathbf{u}}$ . . . . .	Vettore velocità
$\hat{\mathbf{p}}$ . . . . .	Vettore pressione
$\rho$ . . . . .	Densità del fluido
$\mu$ . . . . .	Viscosità dinamica del fluido
$Re$ . . . . .	Numero di Reynolds (caso Macro)
$R$ . . . . .	Numero di Reynolds (caso Micro)
$\epsilon$ . . . . .	Rapporto lunghezze
$\hat{S}^{T_x}$ . . . . .	Sforzo tangenziale lungo x
$\hat{S}^{T_z}$ . . . . .	Sforzo tangenziale lungo z
$\hat{S}^N$ . . . . .	Sforzo normale
$\lambda_x$ . . . . .	Coefficiente usato nel caso Macro a $Y=0$
$m_{12}$ . . . . .	Coefficiente usato nel caso Macro a $Y=0$
$\Phi_s$ . . . . .	Grandezza legata alla geometria
$\lambda$ . . . . .	Grandezza dipendente da $\Phi_s$

$W$	.....	Distanza tra due cerchi (caso 1)
$w$	.....	Diametro del cerchio (caso 2)
$b$	.....	Dimensione del lato del quadrato di base
$u_{\infty}^{+}$	.....	Variabile dipendente microscopica
$y_{\infty}$	.....	Lunghezza di slip
$\theta$	.....	Angolo di tilt
$C_m$	.....	Coefficiente di momento
<b><math>R</math></b>	.....	Raggio del dischetto
$\omega$	.....	Velocità rotore reometro
$\nu$	.....	Diffusività cinematica

# 1 Introduzione

Dalla contemplazione della natura è nato l'interesse per la superidrofobicità. Nel tentativo, ancora attuale, di riprodurre la perfezione dei fenomeni e dei sistemi naturali, l'uomo studia e osserva il cosiddetto "effetto loto", il cui nome deriva dalla pianta di loto, nota per le sue proprietà autopulenti e fortemente idrorepellenti. Accade che le foglie di loto a causa del loro rivestimento costituito da numerosi cristalli di cera idrofobica, risultano essere più repellenti all'acqua poichè il reale contatto tra la goccia d'acqua e la superficie d'appoggio è minimale, grazie alla formazione di uno strato di gas che rimane intrappolato fra le asperità della superficie ruvida e il peso della goccia fa sì che quest'ultima scivoli via. Oggetto della seguente trattazione è l'analisi del moto dell'acqua su una superficie superidrofobica, simulata grazie all'imposizione di differenti condizioni al contorno su una semplice geometria piana. Il problema è trattato considerando due diversi domini, macro e micro; il primo corrisponde alla regione macroscopica del moto, quindi tutto ciò che avviene lontano dalla parete, mentre il secondo corrisponde alla sola porzione di fluido in prossimità di questa. Affinchè i due domini siano collegati tra loro, vengono imposte delle condizioni di raccordo.

## 2 Studio della letteratura

### 2.1 Aspetti generali

Le superfici superidrofobiche (SH) sono definite facendo riferimento a una condizione di staticità, nella quale si osserva che ponendovi una goccia di acqua sopra questa mantiene una forma quasi sferica.[1]

Si definisce a tal proposito una grandezza importante nella trattazione di questi materiali, ossia l'angolo di contatto.

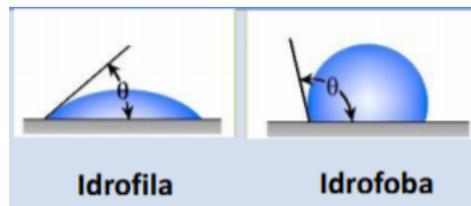


Figura 2.1: Angolo di contatto

L'angolo di contatto ( $\alpha$ ) è definito come l'angolo formato dall'incontro dell'interfaccia liquido-vapore con l'interfaccia liquido-solido; se  $\alpha$  è minore di  $90^\circ$  la superficie è idrofila, se supera i  $90^\circ$  è idrofoba.

Si parla di superidrofobicità, per angoli di contatto  $\alpha$  maggiori di  $150^\circ$ .

Un'altra grandezza che è utile definire è l'energia o tensione superficiale o di interfaccia  $\gamma_{AB}$ , che rappresenta il lavoro per unità di superficie richiesto per aumentare l'area della sostanza A a contatto con la sostanza B.

La tensione superficiale propria di un materiale deriva dal potenziale di legame delle molecole; maggiore è la capacità di creare legami con altri materiali, maggiore sarà la tensione superficiale.

Dall'equilibrio tra le forze adesive, nate dall'interazione solido-liquido, e le forze coesive, si definisce il grado di bagnabilità del materiale.

Con riferimento alla seguente figura, lo scienziato britannico Young propone una formula per calcolare la tensione di adesione  $A$  su una superficie piana, chimicamente omogenea e liscia, sulla quale vi è uno stato di equilibrio solido-liquido-gas.

$$A = \gamma_{SG} - \gamma_{LS} = \gamma_{GL} * \cos \alpha$$

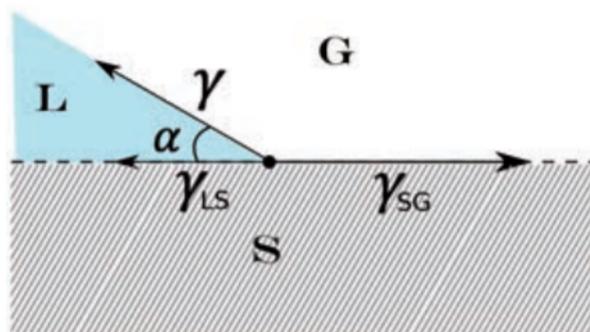


Figura 2.2: Grandezze proposte nella formula di Young

Con  $L$ ,  $G$  e  $S$  si intende rispettivamente la fase liquida, gassosa e solida;  $\alpha$  è l'angolo che si è definito precedentemente e che permette di definire il livello di bagnabilità e quindi la tipologia di superficie.

Successivamente Wenzel introdusse una nuova legge nella quale si tiene conto anche del grado di rugosità della superficie; ciò permette di analizzare i fenomeni di superidrofobicità con maggiore aderenza alla realtà.

Si parla infatti di effettiva tensione di adesione, poichè il termine  $A$  è moltiplicato per  $r$  (fattore di rugosità):

$$rA = \gamma * \cos \alpha_w$$

Il modello può essere ulteriormente semplificato, secondo Wenzel, esprimendo l'equilibrio dell'angolo di contatto è dato da:

$$\cos \alpha_w = r * \cos \alpha$$

La presenza del parametro  $r$  spiega come la rugosità, propria del materiale, rinforzi e migliori la caratteristica di superidrofobicità, rispetto a una superficie totalmente liscia e quindi priva di asperità.

Un aspetto problematico è la presenza di un fenomeno, chiamato isteresi dell'angolo di contatto. A causa di un'asimmetria si crea una differenza di pressione di Laplace tra la parte posteriore della goccia e quella anteriore, dovuta alla differenza di curvatura che la goccia assume su un piano inclinato in condizioni statiche.

L'isteresi, definita come  $\Delta\alpha = \alpha_a - \alpha_r$ , dipende dalle proprietà della superficie (con  $\alpha_a$  si intende l'angolo di contatto anteriore, con  $\alpha_r$  quello posteriore) e non deve superare il valore di  $5^\circ$ .

L'analisi e le osservazioni fatte riguardo la rugosità e l'isteresi, evidenziano come la struttura e la composizione fisico-chimica del materiale influenzi enormemente i fenomeni di superidrofobicità; accade che se l'area di contatto liquido-solido si riduce e il gas è rimasto intrappolato nelle asperità, la condizione di ultra- o superidrofobicità è raggiunta e si assiste a un fenomeno detto Cassie-Baxter o fakir state, per cui le gocce sono sospese sullo strato di gas.



*Figura 2.3: Goccia sospesa*

Cassie-Baxter proposero la seguente formulazione:

$$\cos \alpha_F = f_1 * \cos \alpha - f_2$$

con  $f_1$  si intende l'area totale del solido per unità di area proiettata sotto il liquido e  $f_2$  è definito in modo analogo per l'interfaccia aria-liquido.

Riassumendo si ha che le due fondamentali proprietà affinché una superficie possa essere definita come superidrofobica sono:

- bassa tensione superficiale;
- adeguata rugosità.

Per quanto riguarda la rugosità, le superfici semplicemente microstrutturate (stato Cassie-Baxter, immagine a sinistra) possono subire una transizione di bagnatura con un rapido esaurimento dello strato di gas (o delle bolle di gas), per cui ne consegue il passaggio allo stato di Wenzel (immagine centrale).

In condizioni statiche ciò avviene al di sopra di una differenza di pressione critica tra il liquido e il gas, che è in funzione della scala di rugosità, della tensione superficiale  $\gamma$  e dell'angolo di contatto  $\alpha$ . Può verificarsi che il passaggio allo stato di Wenzel avvenga a causa della solubilità dei gas in acqua, per reazioni chimiche o effetti Marangoni.

Utilizzando superfici micro e nanostrutturate (immagine a destra) si ha che l'angolo di contatto  $\alpha$  è prossimo a  $180^\circ$ , ciò provoca un angolo di contatto maggiore e una più elevata stabilità energetica che posticipa o talvolta evita il passaggio allo stato di Wenzel.

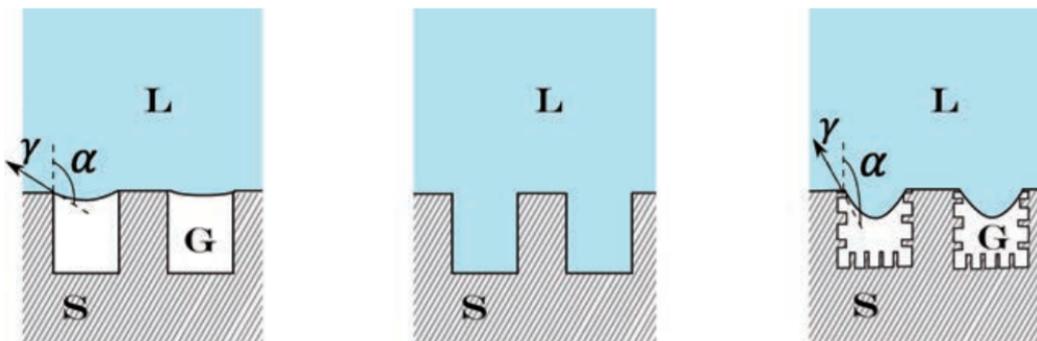


Figura 2.4: Stato di Cassie-Baxter, Stato di Wenzel, Superfici micro e nanostrutturate

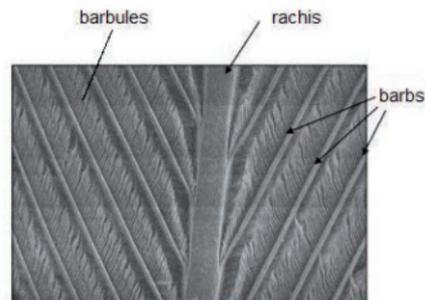
Il maggior ostacolo nella produzione di materiali SH performanti, risiede nella contrastante natura di due grandezze, ossia la lunghezza di slittamento e la transizione di bagnatura; al miglioramento di una, si assiste al crollo dell'altra.

## 2.2 Accenno alla biomimetica

La curiosità per i fenomeni superidrofobici nasce dall'ammirazione e osservazione della natura.

Si suppone che l'inizio di tali studi, sia iniziato nel 1997 con Barthlott & Neinhuis con un'analisi sulle foglie di loto; dopodichè l'attenzione su questo argomento e di conseguenza le pubblicazioni sono aumentate esponenzialmente.

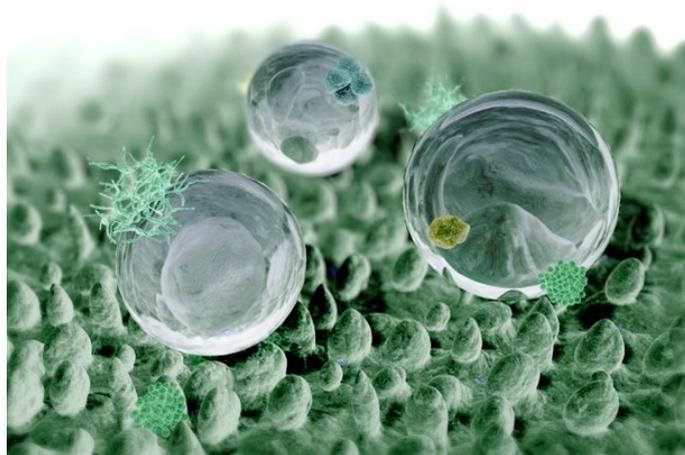
Le foglie di loto, anche in condizioni esterne ostili, hanno la proprietà di essere stabili nello stato Cassie-Baxter, analizzato precedentemente, ciò è legato alla particolare struttura superficiale, detta a due scale.



*Figura 2.5: Struttura a due scale*

La microscopia elettronica ha permesso di studiare la superficie delle foglie di loto ed è emerso che presentano delle protuberanze sporgenti di circa  $20-40 \mu m$ , ciascuna delle quali è ricoperta da una scala più piccola di cristalloidi di cera epicuticolare, che coprono la superficie esterna della pianta e svolgono un ruolo cruciale nella crescita, nello sviluppo e nell'adattamento della pianta all'ambiente. Tale caratteristica è l'origine di superidrofobicità e proprietà autopulenti della foglia di loto.

Sulla base degli studi sulle foglie di loto, vengono prodotte superfici superidrofobiche artificiali secondo due tipi di approcci: con la creazione di strutture gerarchiche (micro e nanostrutture) su substrati idrofobici o con la modifica chimica di una superficie strutturata con una bassa energia libera superficiale.



*Figura 2.6: Gocce sospese sul plastron di gas*

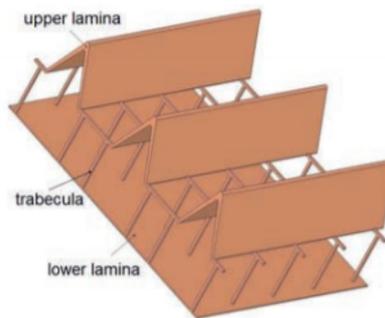
Numerosi studi hanno confermato che la combinazione di rugosità gerarchica insieme ad una bassa energia libera superficiale ha portato alla fabbricazione di superfici superidrofobiche con ottime proprietà.

Proprietà interessanti sono state studiate anche nel mondo animale, in particolare degli insetti.

Il *Gerris remigis* presenta sulla superficie delle zampe una micro e nano-struttura gerarchica, con sete aghiformi orientate longitudinalmente, di lunghezza intorno ai  $100 \mu\text{m}$  e diametro compreso tra alcune centinaia di nanometri e  $3 \mu\text{m}$ .

L'azione delle sete è quella di far riposare l'insetto senza sforzo e far sì che possa manovrare rapidamente e con facilità sull'acqua.

Un'altra specie interessante sono le farfalle e le falene, esse presentano una struttura a due scale e hanno le ali coperte da milioni di minuscoli cristalli fotonici (dalle dimensione di circa  $100 \mu\text{m}$ ) costituiti da chitina, un materiale idrofobo con angolo di contatto  $\alpha$  prossimo a  $100^\circ$ , e disposti sulle ali della farfalla come le tegole sul tetto di una casa. Nelle ali passano delle nervature, composte da una superficie permeabile all'aria.



*Figura 2.7: Struttura ala di farfalla*

Quest'immagine riproduce la struttura di un'ala di farfalla; l'aria può fluire dalla lamina superiore alla regione impermeabile interna (lamina inferiore) attraverso l'interfaccia porosa. La lamina superiore è costituita da creste, di periodicità prossima a  $2 \mu\text{m}$ , e solchi con aperture discrete, che consentono all'aria di fluire attraverso. Le due lamine vengono mantenute separate da strutture, chiamate trabecole.

## 2.3 Realizzazione superfici SH

Sono stati sviluppati negli anni svariati metodi per la realizzazione di superfici superidrofobiche, tutti basati sulle proprietà che stanno alla base di questi materiali ossia la bassa energia superficiale e un'adeguata rugosità.

I materiali che meglio si prestano sono i polimeri che, grazie alla loro versatilità, si adattano bene a essere lavorati per creare questo tipo di superfici.

Spesso si utilizzano processi di microfabbricazioni sviluppati da industrie elettroniche, tuttavia hanno costi molto elevati, sia per l'elevato grado di tecnologia, sia per la necessità di un elevato voltaggio e sia per il ritmo di produzione lento.

Un'altra tecnica, più economica della precedente, è quella di fusione in una fase. Le proprietà idrofobiche che si ottengono sono buone, tuttavia la struttura fibrosa presenta una bassa resistenza all'abrasione e difficoltà per la produzione in larga scala.

Un'altra opzione è la deposizione fatta con spray, permette di rivestire ampie aree. Tuttavia la tecnica più semplice rimane quella per abrasione meccanica diretta della superficie; sono utilizzati dei grani di cartavetrata per creare le asperità sulla base liscia di partenza e a seconda degli angoli di contatto e di quelli di isteresi misurati è possibile classificare e catalogare le superfici ottenute.

Di seguito vi sono quattro immagini SEM (Scanning Electron Microscope) di superfici superidrofobiche realizzate mediante irruvidimento di materiali a base di silicone, mediante l'utilizzo di laser pulsato (a), nanocasting (b), elettrofilatura (c), colata di dimetilformammide (d). [2]

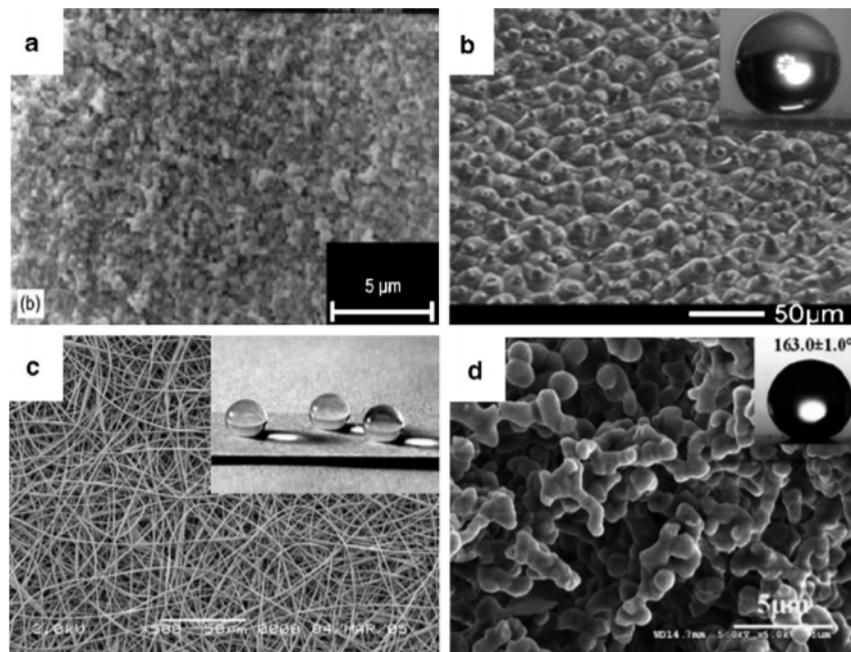


Figura 2.8: Immagini SEM

## 2.4 Tecnologie ed applicazioni

Negli ultimi anni l'attenzione degli studiosi è stata rivolta principalmente alla possibili diverse applicazioni.[3]

Tra le principali proprietà delle superfici SH vi sono le seguenti:

- antighiaccio e antigelo;
- antimicrobica;
- super-repellente;
- autopulente;
- anticorrosiva;
- adesiva e magnetica.

Alcuni esempi degli usi più comuni sono: la protezione delle apparecchiature elettriche, la protezione dai danni e dalla corrosione del metallo, legno o tessuti, la protezione delle ali degli aerei o delle linee di trasmissione dall'accumulo di ghiaccio, la pulizia dei parabrezza delle auto o delle porte delle docce, ecc...

Tra gli sviluppi futuri vi è la potenziale applicazione dei rivestimenti SH sulle navi per la riduzione della resistenza aerodinamica e sulla carena delle navi per l'anti-vegetativa, ossia un trattamento speciale che si applica sulla parte della barca che rimane immersa in acqua con l'obiettivo di ridurre la formazione di alghe, evitando così un crollo delle prestazioni e un conseguente aumento dei consumi.

### 3 Formulazione matematica

Il problema verrà trattato analizzando separatamente due sottodomini che chiameremo domini macro e micro; il primo corrisponde alla regione macroscopica del moto, mentre il secondo corrisponde alla sola porzione di fluido in prossimità della parete scabra. Il collegamento tra i due domini sarà effettuato tramite condizioni di raccordo.

Per semplicità verrà trattato il caso cartesiano, con coordinate spaziali definite tramite le variabili dimensionali  $(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z})$ .

La variabile indipendente tempo è indicata con  $\hat{t}$ , mentre il vettore velocità e la pressione sono, rispettivamente,  $\hat{\mathbf{u}} = (\hat{u}, \hat{v}, \hat{w})$  e  $\hat{p}$ .

#### 3.1 Equazioni iniziali, continuità e quantità di moto

Usando la notazione con gli indici, le equazioni in forma dimensionale sono:

$$\frac{\partial \hat{u}_i}{\partial \hat{x}_i} = 0$$

$$\rho \frac{\hat{D}\hat{u}_i}{\hat{D}\hat{t}} = -\frac{\partial \hat{p}}{\partial \hat{x}_i} + \mu \frac{\partial^2 \hat{u}_i}{\partial \hat{x}_j^2}$$

con l'operatore  $\frac{\hat{D}}{\hat{D}\hat{t}}$  definito come  $\frac{\hat{D}}{\hat{D}\hat{t}} = \frac{\partial}{\partial \hat{t}} + \hat{u}_j \frac{\partial}{\partial \hat{x}_j}$ .

Si osservi che il primo indice fa riferimento alla direzione  $x$ , il secondo alla direzione  $y$  e il terzo a  $z$ .

Scriviamo in forma adimensionale le equazioni sia per il caso macro che per il caso micro utilizzando delle scale appropriate.

##### Scale macro

- $L$ : scala di lunghezza
- $\bar{U}$ : scala di velocità
- $\rho \bar{U}^2$ : scala di pressione
- $\frac{L}{\bar{U}}$ : scala di tempo

##### Scale micro

- $l$ : scala di lunghezza
- $\bar{u}$ : scala di velocità
- $\mu \frac{\bar{u}}{l}$ : scala (viscosa) di pressione
- $\frac{l}{\bar{u}}$ : scala di tempo

Le variabili adimensionalizzate sono quindi:

**Macro**

- $X_i = \frac{\hat{x}_i}{L}$
- $U_i = \frac{\hat{u}_i}{\bar{U}}$
- $T = \frac{\hat{t}\bar{U}}{L}$
- $P = \frac{\hat{p}}{\rho\bar{U}^2}$

**Micro**

- $x_i = \frac{\hat{x}_i}{l}$
- $u_i = \frac{\hat{u}_i}{\bar{u}}$
- $t = \frac{\hat{t}\bar{u}}{l}$
- $p = \frac{\hat{p}l}{\mu\bar{u}}$

Ora è possibile riscrivere le equazioni nella forma adimensionalizzata.

**Problema macro**

Equazione di continuità:

$$\frac{\partial U_i}{\partial X_i} = 0$$

Equazione di quantità di moto:

$$\frac{\partial U_i}{\partial T} + U \frac{\partial U_i}{\partial X} + V \frac{\partial U_i}{\partial Y} + W \frac{\partial U_i}{\partial Z} = -\frac{\partial P}{\partial X_i} + \frac{1}{Re} \nabla^2 U_i,$$

dove abbiamo introdotto il numero di Reynolds, per il caso macro  $Re = \rho U L / \mu$  e il laplaciano macroscopico  $\nabla^2 = \partial / \partial X_j^2$ .

É importante notare che le variabili dipendenti macroscopiche dipendono solo da  $X_i$  e, eventualmente, da  $T$ .

## Problema micro

Equazione di continuità:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0$$

Equazione di quantità di moto:

$$\mathcal{R} \left( \frac{\partial u_i}{\partial t} + u \frac{\partial u_i}{\partial x} + v \frac{\partial u_i}{\partial y} + w \frac{\partial u_i}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \nabla'^2 u_i,$$

dove  $\mathcal{R}$  rappresenta il numero di Reynolds per il caso micro,  $\mathcal{R} = l\bar{u}/\nu$ , e  $\nabla'^2 = \partial/\partial x_j^2$  è il laplaciano microscopico. [4]

Possiamo riscrivere l'equazione di quantità di moto per il caso micro introducendo il piccolo parametro  $\epsilon$ ,  $\epsilon = l/L = \bar{u}/\bar{U} \ll 1$ .

Siccome si ha  $\mathcal{R} = \epsilon^2 Re$  possiamo scrivere:

$$\epsilon^2 Re \left( \frac{\partial u_i}{\partial t} + u \frac{\partial u_i}{\partial x} + v \frac{\partial u_i}{\partial y} + w \frac{\partial u_i}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \nabla'^2 u_i.$$

La presenza di  $\epsilon$  nelle equazioni microscopiche segnala che uno sviluppo perturbativo, con le variabili dipendenti espresse in potenze di  $\epsilon$ , può essere tentato.













Nella regione di contatto liquido-gas, le condizioni in  $y = 0$  sono:

$$\begin{cases} u_y^\# = 0 \\ v^\# = 0 \\ w_y^\# = 0 \end{cases}$$

E' semplice trovare che  $p^\# = -1$  e  $u^\# = v^\# = w^\# = 0$ , cosicchè la soluzione del problema all'ordine  $\mathcal{O}(\epsilon^0)$  si riduce a:

$$\begin{cases} u^{(0)} = u^+ S^{T_x} + u^\dagger S^{T_z} \\ v^{(0)} = v^+ S^{T_x} + v^\dagger S^{T_z} \\ w^{(0)} = w^+ S^{T_x} + w^\dagger S^{T_z} \\ p^{(0)} = p^+ S^{T_x} + p^\dagger S^{T_z} - S^N \end{cases}$$



Tre problemi forzati da  $S_{X_j}^N$

$$\begin{cases} \frac{\partial \check{u}_{ij}}{\partial x_i} = 0 \\ -\frac{\partial \check{p}_j}{\partial x_i} + \frac{\partial^2 \check{u}_{ij}}{\partial x_k^2} = -\delta_{ij} \end{cases}$$

con condizioni al contorno in  $y_\infty$ :  $-\check{p}_j \delta_{i2} + \frac{\partial \check{u}_{2j}}{\partial x_i} + \frac{\partial \check{u}_{ij}}{\partial y} = 0$ .

In  $y = 0$ , all'interfaccia liquido-gas, si impone:

$$\begin{cases} \frac{\partial \check{u}_{1j}}{\partial y} = 0 \\ \check{u}_{2j} = 0 \\ \frac{\partial \check{u}_{3j}}{\partial y} = 0 \end{cases}$$



























I risultati che si ottengono utilizzando FreeFEM (partial differential equations solver) sono:

Valori di u	Valori di v	Valori di p
$u_{max}^+ = 5.05514$	$v_{max}^+ = 0.034186$	$p_{max}^+ = 48.5904$
$u_{min}^+ = 1.30909e - 33$	$v_{min}^+ = -0.0341864$	$p_{min}^+ = -48.5445$

I valori delle componenti di velocità sul bordo superiore della cella elementare, da impiegare nella condizione al contorno effettiva per il problema macroscopico sono:

$$u_{top}^+ = 5.05514 \quad v_{top}^+ = -1.43362e - 09$$





















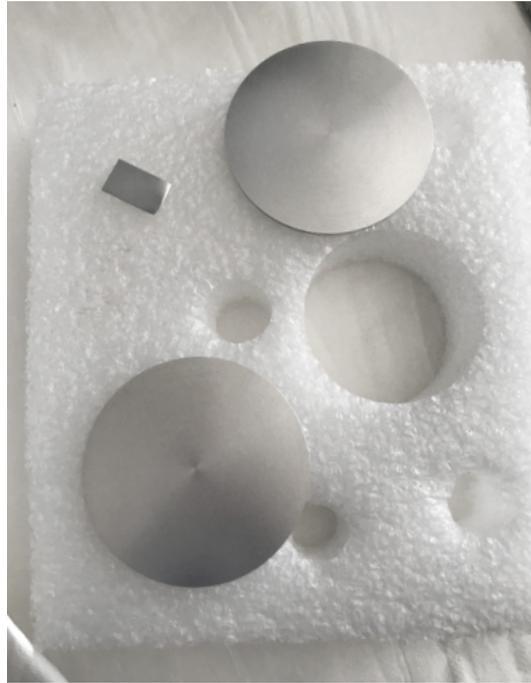












*Figura 7.2: Elementi trattati con Ultra Ever Dry*

Oltre ai due dischetti, con il medesimo procedimento, è stato trattato un piccolo pezzetto dello stesso materiale che sarà utile per fare le analisi morfologiche con il microscopio elettronico.

Il rivestimento inferiore è composto da polimero, utilizzato per legare lo strato superiore, mentre nel top coat sono presenti particelle micrometriche di biossido di silicio disperse in un solvente.

Una superficie così ricoperta è formata da una sorta di maglia tridimensionale con grani di dimensioni variabili (tra 10 e 50  $\mu\text{m}$ ) disposti uniformemente su tutta l'area.

## 7.2 Misure dell'angolo di contatto statico

La prima fase di analisi delle superfici superidrofobiche realizzate è stata quella legata alla misurazione dell'angolo di contatto statico.

Lo strumento utilizzato è costituito da una piattaforma, dove tramite un supporto è stato appoggiato il dischetto superidrofobico (vedi figura 7.3); ad una estremità della piattaforma è posizionata la sorgente di luce mentre all'altra si trova l'ottica di misura e la telecamera interfacciata ad un computer, che tramite un software Windows consente di catturare le immagini.



*Figura 7.3: Misuratore d'angolo di contatto e goccia pendente*

La piattaforma di misura può essere spostata facilmente e velocemente lungo i tre assi di misura attraverso tre manopole, mentre la qualità dell'immagine viene ottimizzata regolando zoom, messa a fuoco e intensità della sorgente di luce.

Sulla la piattaforma è stato posizionato il dischetto e sopra, tramite una micropipetta graduata, sono state appoggiate una serie di gocce di acqua demineralizzata.



*Figura 7.4: Dischetto con goccia*



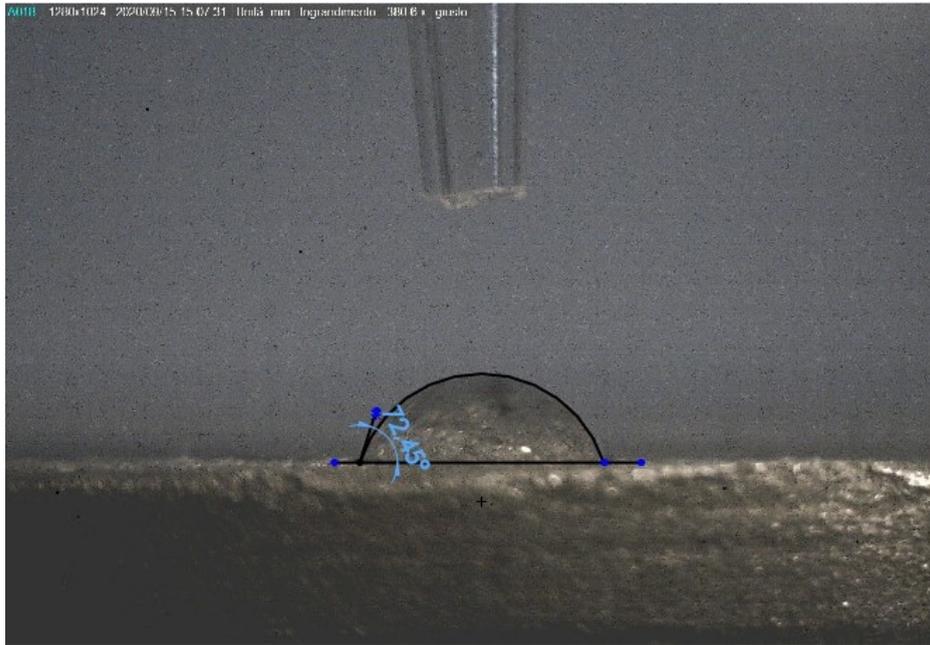




In entrambi i campioni l'angolo di contatto statico della goccia analizzata presenta valori superiori a  $150^\circ$ , che come si sa dalla letteratura è il valore sopra al quale una superficie può essere definita come superidrofobica.[1]

Di seguito si riporta l'elaborazione dell'immagine ottenuta per l'angolo di contatto statico su una superficie trattata in lega di alluminio, trascorso circa 1 minuto dal momento in cui la goccia è stata poggiata sul dischetto in modo tale da permetterne un assestamento.

Come si è visto nelle immagini ottenute dal dischetto in lega di alluminio, la goccia ha modificato la sua forma nel tempo in modo molto evidente.



*Figura 7.19: Elaborazione misura angolo di contatto statico (Lega di Al)*

L'angolo misurato è inferiore a  $90^\circ$ , coerentemente con la natura idrofila del materiale che compone questo dischetto.































