Superfici Nanostrutturate e Nanotribologia

Versione: 07/01/2013

I materiali di NANOLAB, incluso il presente documento, sono proprietà degli autori di NANOLAB (www.nanolab.unimore.it) e distribuiti con licenza Creative Commons 3.0

Attrito alla micro e nanoscala - Effetto Lotus

In un materiale le proprietà di superficie sono strettamente legate sia alla chimica che alla topografia alla micro- e nano-scala. Mentre le superfici prodotte con metodi convenzionali presentano una scabrosità distribuita in modo casuale, che rende difficile ridurre l'attrito e l'usura, si è scoperto recentemente che molte superfici biologiche di tipo funzionale hanno una rugosità strutturata in gerarchie complesse, che ne determina le proprietà. Ad esempio le foglie di alcune piante, prima fra tutte quella del loto, grazie ad una struttura siffatta risultano dotate di eccezionali proprietà superidrofobiche. Prendendo ispirazione dalla natura, la creazione di asperità micro- e nano-metriche sulle superfici viene sempre più spesso consapevolmente utilizzata per modificare in modo controllato le caratteristiche delle superfici stesse.

In particolare, tale tecnica può rendere i sistemi tribologici[1] più efficienti e rispettosi dell'ambiente ('green tribology'). Basti pensare, come esempio, all'accumulo di microorganismi, piante, etc sulle scafo delle navi, con conseguente aumento fino al 40% del consumo di carburante, o nei tubi degli impianti industriali, con notevole calo di efficienza. Normalmente vengono applicate sostanze chimiche la cui azione può essere di efficacia limitata o nociva per l'ambiente. Analogo ragionamento si applica ai metodi di protezione dal ghiaccio di pale eoliche, ali d'aereo e cavi elettrici. Tutto questo può essere già ora efficacemente sostituito da lavorazioni microstrutturate delle superfici che semplicemente impediscono a ghiaccio ed incrostazioni di attaccarsi, essenzialmente grazie ad un cuscino d'aria che si forma all'interfaccia.

Classificazione delle superfici relativamente alla bagnabilità

[1] La tribologia è la scienza che studia l'attrito, la lubrificazione e l'usura. Il termine deriva dal greco 'tribos', che significa 'strofinamento'

Tra le proprietà di superficie, molto importante ai fini dei problemi tribologici è la **bagnabilità,** ovvero il grado di adesione di un liquido deposto sulla superficie in esame. Essa dipende innanzitutto dai gruppi terminali delle molecole all'interfaccia del solido, che possono essere, con varie gradazioni, o idrofile o idrofobe (**fattore chimico**). Questo si combina alla strutturazione della superficie alla nano-scala che, come si è visto, influenza anch'essa l'interazione tra le superfici (**fattore fisico**).

Di seguito discuteremo due parametri fondamentali per la classificazione quantitativa delle superfici in base alla bagnabilità, **l'angolo di contatto statico** e **l'angolo di rotolamento**, che ci permetteranno di comprendere i meccanismi fisici alla base della bagnabilità.

1. Angolo di contatto statico

Si tratta dell'angolo compreso tra la tangente all'interfaccia Liquido-Gas e la tangente alla superficie solida all'interfaccia Solido-Liquido, in corrispondenza della linea di contatto tra le tre fasi (Fig. 1). La lettura viene fatta subito dopo che la goccia di liquido è stata deposta sul substrato da esaminare ed è stato raggiunto l'equilibrio termodinamico tra le fasi solido, liquido, e gas.

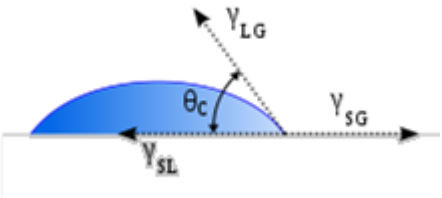
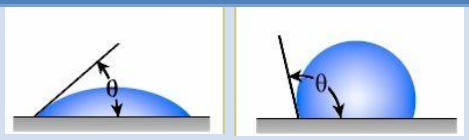


Fig.1 Angolo di contatto

Una superfice idrofobica minimizza spontaneamente l'interfaccia di contatto tra la superfice stessa e il liquido. Perciò l'angolo di contatto è una misura efficace della sua idrofobicità: maggiore è l'angolo di contatto, più sferica è la goccia e più idrofobica è la superficie. Minore è l'angolo di contatto, più "schiacciata" è la goccia e più elevata è l'idrofilia del materiale. Il vetro, ad esempio, se non subisce speciali trattamenti, è idrofilo: le gocce d'acqua si allargano totalmente sulla superficie con un angolo di contatto di pochissimi gradi. Al contrario, il teflon è superidrofobico: le gocce deposte su di esso assumono una forma tondeggiante.

Angolo di contatto (°C)	Tipologia superficie
0°	superidrofila
> 30°	idrofila
30°-90°	intermedia
90°-140°	idrofoba
>140°	Superidrofoba



Idrofila **Idrofoba**

Fig.2 Tabella di classificazione delle superfici in base all'angolo di contatto.

Per comprendere meglio come la forma della goccia sia legata alle proprietà idrofobe/idrofile della superfice, consideriamo innanzitutto una goccia nello spazio libero, in assenza di gravità o di altre forze che non siano quelle intramolecolari del liquido. Questa risulterà perfettamente sferica. Le molecole di un liquido, infatti, interagiscono attrattivamente con le altre molecole. Perciò la

configurazione energeticamente più favorevole consiste nell'avere le molecole più dense possibile. In altre parole, creare una superfice ha un costo in energia, detta energia di capillarità, ed è proporzionale all'area, con costante di proporzionalità data dalla tensione superficiale ϒ. In assenza di forze esterne, perciò, un liquido tende a rendere minima la superficie, a parità di volume, ovvero ad assumere la forma sferica.

Fig.3 In assenza di gravità, ad es. nello spazio, le gocce sono perfettamente sferiche.

Vi sono però forze che contrastano questa tendenza ideale. In presenza di gravità, per esempio mentre cadono in aria, le gocce hanno ancora forma sferica se le loro dimensioni sono sufficientemente piccole e si può trascurare l'attrazione gravitazionale. Questa condizione 'ideale' è definita dalla uguaglianza

$$\lambda_c = \sqrt{\gamma / \rho g}$$

dove λ_c è detta **lunghezza di capillarità**, γ è la tensione superficiale dell'interfaccia liquido/aria e ρ la densità del liquido di cui è costituita la goccia. Per l' acqua pura a temperatura e pressione standard $\lambda_c \sim 2$ mm, mentre per una bolla di sapone può raggiungere 4 m. Se le dimensioni della goccia superano λ_c la forze di gravità non è più trascurabile, e la forma di equilibrio sferico viene deformata.

Analogamente, posandosi su una superficie solida idrofillica, una goccia d'acqua si 'attacca' per effetto delle forze attrattive tra le molecole del liquido e del solido, assumendo la forma di una calotta sferica con l'angolo di contatto minimo possibile. Ancora una volta la goccia tende a risiedere nello stato di minima energia.

Dai ragionamenti precedenti, è intuitivo che i fenomeni superficiali sono fondamentali nel determinare la forma della goccia, e quindi l'angolo di contatto: questi dipendono dal bilanciamento tra

- forza d'interazione tra liquido ed solido, detta **forze di adesione,** dovuta all'attrazione tra le molecole del liquido e quelle del solido; queste tendono ad aumentare l'area di interfaccia superficie/liquido, appiattendo la goccia;
- **forze di coesione, che** tendono a minimizzare la superfice, generando una forma più sferica possibile.

Il profilo di una porzione di liquido posta su di una superficie solida formerà con essa un angolo θ (Fig. 4) maggiore o minore di 90°, a seconda che nel punto P prevalga in modulo la risultante delle forze di coesione, Fc, normale alla tangente al profilo del liquido in P e rivolto verso l'interno, oppure la risultante delle forze di adesione, Fa, normale alla superficie solida rivolto verso di essa.

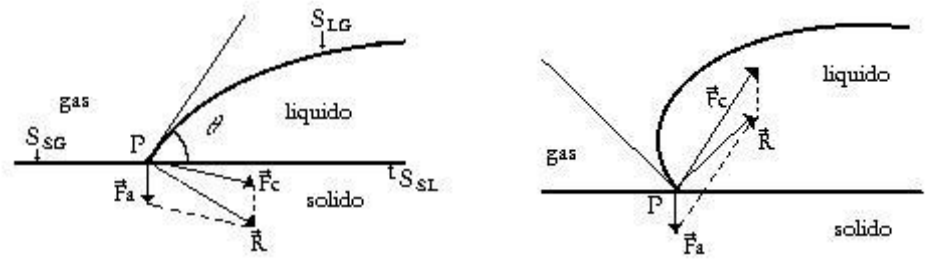
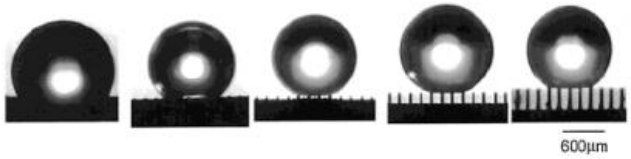


Fig.4 L'ampiezza dell'angolo di contatto dipende dal bilanciamento delle forze di adesione su quelle di coesione. SLG, SSL e SSG, rispettivamente le superfici di separazione liquido/gas, solido/liquido e solido/gas. Immagine Wikipedia http://it.wikipedia.org/wiki/Tensione_superficiale.

Normalmente i solidi idrofobici, quali la cera, hanno un angolo di contatto già piuttosto elevato ma che non supera i 140°. Per ottenere angoli maggiori è necessario aggiungere all'effetto idrofobico di natura chimica quello di natura fisica ottenuto, strutturando opportunamente le superfici solide con asperità nanometriche. Questo permette di raggiungere il regime di **superidrofobicità**. Trattando la superficie in modo da ottenere un alternarsi di pilastri e di vuoti, eventualmente anche su più livelli gerarchici (ad esempio pilastri nell'ordine dei micrometri sulla cui cima sono presenti asperità nanometriche) la goccia rimarrà quasi sospesa. In queste condizioni la goccia tornerà ad essere una sfera quasi perfetta (angoli di contatto tipicamente tra i 160° e 175°), come se fosse in aria, iniziando a rotolare se la superficie viene inclinata anche di pochissimi gradi. La ragione è intuitivamente semplice: quando la superficie di contatto tra goccia e solido si riduce alle sole cime delle asperità, allora le forze di adesione che mantengono la goccia attaccata diventano estremamente piccole.



Contact angle of water θ [deg]	114	138	155	151	153
Roughness factor r	1.0	1.1	1.2	2.0	3.1
Pillar height c [μm]	0	10	36	148	282

Fig.5 http://www.scienzainrete.it/contenuto/articolo/Bolle-gocce-e-biglie.

Questo modo di strutturare la superfice è analogo a ciò che la natura fa spontaneamente. Nella foglia di loto come in quella di nasturzio (Fig.6) sulla superficie sono presenti nanocristalli di cera di poche decine di nanometri, come si vede dalle immagini al microscopio elettronico a scansione. L'effetto è talmente spettacolare che quando si vuole indicare una situazione di estrema idrorepellenza si parla di "effetto Lotus"

Fig.6 Immagini SEM della superficie di una foglia di nasturzio. Ingrandimenti successivi http://www.nisenet.org/image-collection

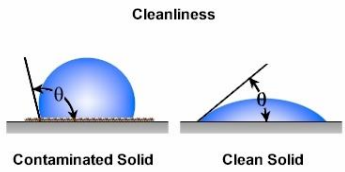


Fig.7 Angolo di contatto come misura della contaminazione di una superficie..

L'angolo di contatto statico viene spesso utilizzato anche come **misura indiretta della pulizia di una superficie**. La bagnabilità risulta infatti fortemente influenzata dallo stato di levigatezza e dalla presenza di impurità sulla superficie del materiale stesso. I contaminanti organici si oppongono alla bagnabilità producendo sulle superfici idrofile angoli di contatto più elevati del normale. Nella fabbricazione dei semiconduttori, ad esempio, l'angolo di contatto è utilizzato per caratterizzare la bagnabilità dei wafer di silicio, valutando l'efficacia dei processi di produzione e le modificazioni della superficie prodotte tramite etching, passivazione, agitazione con ultrasuoni ed altri trattamenti o processi di pulizia, come pure per quantificare l'effetto di resine, vernici, ossidazioni, lucidatura, etc.

2. Angolo di rotolamento (roll off angle o tilt angle)

Mentre l'angolo di contatto fornisce un'informazione sull'equilibrio statico della superfice, in molti casi di interesse è importante che il liquido riesca a scorrere via rapidamente. E' utile quindi considerare un ulteriore fattore quando si tratta la superidrofobicità: *l'angolo di tilt* (o *roll off angle),* l'angolo minimo a cui deve essere inclinata una superficie perché la goccia sia in grado di mettersi in moto. Anche questa misura può essere utilizzata per classificare le superfici, ma il risultato non coincide necessariamente con quanto ottenuto misurando il solo angolo di contatto. Attualmente si parla di superfici superidrofobiche quando l'angolo di contatto statico è attorno ai 150° e l'angolo di tilt <10°.

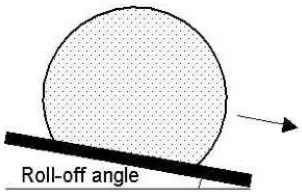


Fig.8 Angolo di rotolamento o di tilt

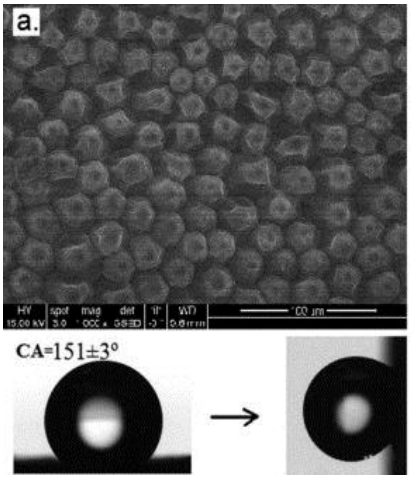


Fig. 9 Gocce deposte su petali di rosa mostrano un elevatissimo angolo di contatto ma una altrettanto elevata adesione . Per gentile concessione M Karaman Department of Chemical Engineering, Selcuk University, Konya, Turkey.

Per chiarire può essere utile confrontare *l'effetto Lotus* col meno noto *effetto petalo*. Petali di alcune rose, pur risultando superidrofobici, così da favorire la formazione di gocce perfettamente sferiche, sviluppano una elevatissima adesione che non permette al liquido di rotolare, diversamente da quanto succede ad esempio nelle foglie di loto o di nasturzio. Nelle rose le gocce rimangono attaccate anche a testa in giù! Naturalmente ciò è vero solo per gocce di massa ridotta in cui la forza di gravità è debole.

E' abbastanza curioso il fatto che i due effetti abbiano cause simili. Come nella superidrofobicità, che origina dalla interazione con una superficie scabrosa dove sacche d'aria rimangono intrappolate tra superficie solida e quella liquida sul petalo di rosa sono presenti micro e nanostrutture. Queste, tuttavia, sono più grandi e permettono all'acqua di penetrare più facilmente: file ordinate e ravvicinate di micropapille, simili a piccolissimi foruncoli, sono presenti sulla superficie. L'acqua, penetrando, forma interazioni relativamente forti con la superficie del petalo. Tuttavia, ogni micropapilla è a sua volta coperta da piccoli nanosolchi, larghi circa 760nm, troppo piccoli perché l'acqua penetri con facilità al loro interno, garantendo così anche l'effetto superidrofobico.

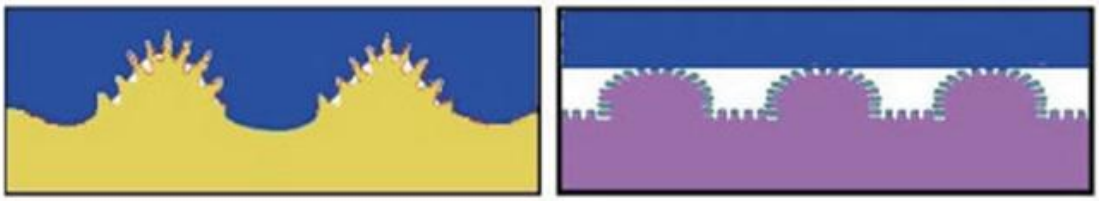


Fig.10 *a) Le gocce deposte su petali di rosa si "infilzano" aderendo sulle protuberanze. B) Diversa appare invece la microstrutturazione della superficie della foglia di loto che favorisce una minima adesione. Per gentile concessione M.Karaman Department of Chemical Engineering, Selcuk University, Konya, Turkey*

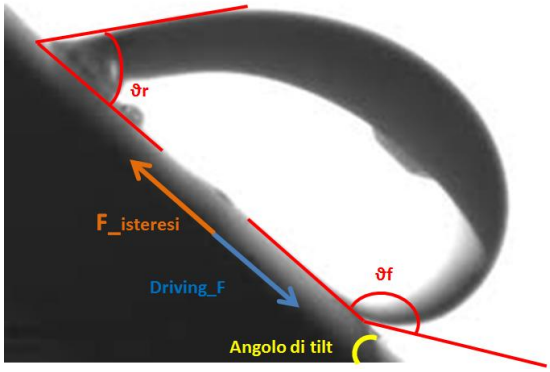


Fig.11 L'isteresi dell'angolo di contatto è un parametro di tipo dinamico: fornisce informazioni sulla mobilità della goccia sulla superficie in esame.

L'angolo di tilt è legato alla cosiddetta **isteresi dell'angolo di contatto,** Δϑ, definita come la differenza tra l'angolo di contatto sul retro, ϑr, e quello nella posizione frontale, ϑf, su una superfice inclinata. Δϑ può raggiungere i 50° sulla superfice dei solidi più comuni. La differenza tra i due angoli è dovuta a disomogeneità del substrato (piccole eterogeneità, contrasto tra zone bagnabili/non bagnabili, asperità, etc.) che tendono a bloccare il fronte anteriore della goccia. Si genera pertanto un gradiente di curvatura che induce a sua volta un gradiente di pressione all'interfaccia,[2] inducendo una forza capillare (*F_isteresi*) opposta alla componente parallela della forza di gravità (*driving_F*) (Fig.11).

Nel caso della superidrofobicità l'angolo di contatto è elevatissimo (150°÷180°), mentre la sua isteresi si abbassa drasticamente (<10°) perché l'aria intrappolata sotto la goccia "omogenizza" la superficie del solido. Grazie a questo duplice effetto ϑ → 180° Δϑ→0° e anche gocce molto piccole aderiscono molto meno di quanto abitualmente accade.

Per avere quindi il massimo della mobilità bisogna contemporaneamente massimizzare l'angolo di contatto e minimizzare la sua isteresi. Dal punto di vista pratico si può progressivamente ridurre la superficie solida intervallandola con fessure vuote di dimensioni micrometriche. In questo modo la linea di contatto tocca la superficie solo sulle punte delle colonne solide. Esiste tuttavia un limite fisico, dal momento che esiste una pressione statica massima che può essere sostenuta dai pilastri d'aria (fig.12b -Cassie-Baxter state) oltre la quale l'acqua penetra all'interno delle cavità aderendo così intimamente alle asperità della superficie solida, impedendone la mobilità (fig. 12 a- Wenzel State).

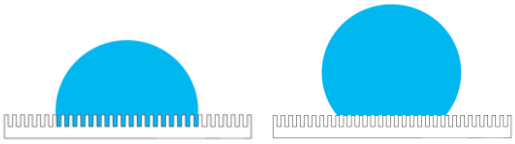


Fig.12 a) Wenzel Model e b) Cassie Baxter Model

Dal **punto di vista applicativo,** oltre a impedire la formazione di ghiaccio sulle ali degli aerei, sui cavi elettrici, sulle pale eoliche, etc., migliorare il rotolamento del liquido sulle superfici può essere

[2] L'aumento della curvatura corrisponde ad un aumento della pressione alla linea di contatto liquido-aria: tale pressione risulterà minore sul retro della goccia rispetto al fronte di avanzamento. Sul retro le forze di adesione all'interfaccia solido-liquido aumenteranno di importanza rispetto alle forze di coesione generano pertanto una reazione (forza capillare) opposta alla forza peso.

di estrema importanza

a) nelle centrali energetiche ed impianti industriali che basano il proprio funzionamento sul trasporto del calore, nei casi in cui la condensazione del vapore può portare ad una riduzione dell' efficienza;
b) nelle superfici autopulenti, in cui il rotolamento delle gocce permette di inglobare e asportare le particelle contaminanti (che, avendo dimensioni maggiori rispetto a quelle delle strutture superficiali, non penetrano nelle rugosità;
c) mel controllo e manipolazione del moto di singole gocce in sistemi microfluidici;
d) nei vetri dei parabrezza dove l'adesione delle gocce di pioggia può compromettere la visibilità;
e) in occhiali e maschere, dove impedisce il formarsi della condensa.[3]
f) nei palloni aerostatici dotati di sensori che vengono lanciati nell'atmosfera per misure di natura metereologica.

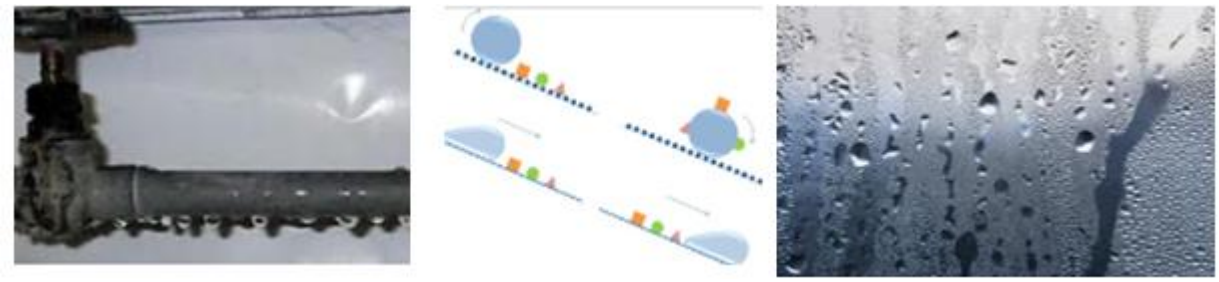


Fig.13 L'eliminazione della condensa sulle tubature, le superfici autopulenti ed i parabrezza con trattamento antipioggia sono solo alcune delle possibili applicazioni di coating superidrofobici.

Coating superidrofobici per ridurre l'attrito di solidi in un liquido?

Una volta studiato il moto di un liquido su di una superficie superidrofobica ci si può giustamente chiedere cosa avviene invece se un solido con superfice superidrofobica si trova in movimento in un liquido. Non si tratta naturalmente di una pura curiosità scientifica: dispositivi di questo tipo potrebbero portare ad un enorme risparmio energetico se anche in questo caso l'attrito risultasse ridotto. Questa ipotesi non trova però conferma sperimantale: gli attuali coating superidrofobici sembrano aumentare piuttosto che ridurre l'attrito dell'oggetto nel liquido. Risultano maggiormente efficaci rivestimenti semplicemente idrofobici, ad ulteriore riprova che la chiave del problema risiede nello strato d'aria che tipicamente si forma tra le due interfaccia solido-liquido in condizioni di superidrofobicità.

[3] In altri casi invece si può ricercare l'effetto opposto. Esistono rivestimenti antinebbia con cui la superficie dei vetri dei parabrezza viene resa superidrofila. La condensa è così forzata a creare un sottilissimo strato uniforme di acqua anziché tante goccioline ed in tal modo si evitano I fenomeni di diffusione luminosa ed il vetro conserva la sua totale trasparenza.

In effetti la situazione non è simmetrica. Innanzitutto va considerato il fatto che nel caso di oggetti in moto in un liquido l'attrito è fondamentalmente tra i vari strati (lamine) liquido-liquido che scivolano uno sull'altro più che tra solido – liquido (in regime laminare il primo strato di liquido aderisce infatti alla superficie solida e si muove in modo solidale con esso)
In secondo luogo va analizzato attentamente il ruolo dello strato d'aria di cui sopra. Considerando che la viscosità dell'aria è minore di quella dell'acqua, si potrebbe ritenere infatti che lo strato di piccole bolle d'aria possa giocare un ruolo fondamentale nella riduzione dell'attrito tra fluidi e superfici superidrofobiche. Questo è vero nel caso del moto laminare (dove il sottile strato d'aria funziona come lubrificante, un po' come nell'hovercraft), ma non nel caso di moto turbolento, dove, paradossalmente, la superidrofobicità pare essere controproducente. La resistenza delle bolle d'aria è infatti dovuta a due componenti, l'attrito e la pressione. Il fatto che la viscosità dell'aria sia minore di quella dell'acqua può diminuire la prima componente, ma rischia di aumentare la seconda fino al punto che nei moti di tipo turbolento la presenza di uno strato di bolle d'aria legato allo stato di superidrofobicità può risultare addirittura di impedimento al moto. D'altra parte la relazione di Laplace relativa alla variazione di pressione all'interfacccia dovuta alla curvatura della superficie prova che quanto più è piccolo il raggio di curvatura delle bolle e tanto maggiore sarà la differenza di pressione sulle due facce della superficie di separazione tra i due fluidi (aria/acqua). Tanto per dare una idea si è calcolato che il raggio di 0,10 mm di una bollicina di spumante implica una differenza di pressione di 1,5 kPa sufficiente a sostenere una colonna d'acqua di 15 cm.
Non è quindi del tutto peregrina l'ipotesi che l'aria funzioni non più da lubrificante ma da sostegno e conseguente smorzatore del moto nel fluido.

Liquid Marbles

E' possibile ottenere un grado di idrofobicità molto elevato anche operando sulla struttura della superficie liquida, anziché quella solida, ricoprendo le gocce di polveri superidrofobiche, le cosiddette "liquid marbles". Queste funzionano come micro serbatoi di liquido in movimento, dimostrano una riduzione drammatica dell'adesione, possono rotolare, in alcuni casi anche rimbalzare. Si comportano cioè come *soft solids,* la cui elasticità deriva dalla tensione superficiale. Grazie all'assenza della linea di contatto liquido/solido è possibile realizzare moti molto veloci. Vengono inoltre minimizzati i problemi di perdite, e la forza necessaria per muoverle è estremamente bassa, nonostante le dimensioni ridottissime delle gocce (l'equilibrio tra adesione superficiale e gravità favorirebbe invece il moto delle particelle più pesanti). Tutte proprietà che possono essere di grande interesse, in particolare, nelle applicazioni microfluidiche.

A causa della idrofobicità, i grani di polvere, anziché mescolarsi al liquido, migrano all'interfaccia acqua-aria, formando un mono-strato. Poiché la dimensione dei grani è molto più piccola della lunghezza capillare (millimetrica) la gravità passa in secondo piano rispetto alle forze capillari. Perché ciò avvenga però la dimensione dei grani deve essere molto inferiore alla dimensione della goccia (pochi millimetri di diametro): tipicamente tra 1 e 50 μm. Come polvere i ricercatori hanno utilizzato fuliggine, polvere di grafite o licopodio nonché sfere di silicio trattate in modo da renderle idrofobiche. Grazie alla copertura superidrofobica la forma assunta dalla goccia non

dipende più dal substrato e, in generale, in condizioni statiche rimane stabile nel tempo.

Le *liquid marbles* potrebbero essere utilizzate non solo nel trasporto di un liquido su un substrato solido ma anche di un liquido su di un'altra superficie liquida. Sono state eseguite delle prove per cui a seconda della sostanza e del modo in cui la goccia incapsulata viene depositata sulla superficie è possibile che essa prima di fondersi galleggi addirittura per 1 minuto, molto di più di una goccia di acqua su una superficie pure di acqua che in presenza di surfattanti ha una vita media di 0.3 secondi. Se invece la goccia è deposta sulla superficie di un liquido da cui la polvere è bagnata (come olio o alcool) si verifica l'immediata distruzione della goccia. Ciò potrebbe tornare utile per eliminare l'incapsulamento e consentire così il rilascio del liquido alla fine del percorso, un altro dei problemi nell'implementazione di questo sistema di trasporto microfluidico "a gocce"(si vorrebbe poter aprire e chiudere la goccia "a comando", ottenendo il rilascio della sostanza liquida quando e dove si vuole o, viceversa, l'aggiunta di nuove sostanze-reagenti chimici- alla goccia già esistente).

La zona di contatto non si limita ad un solo punto come ci si aspetterebbe da una situazione di superidrofobicità. A causa della forza peso la goccia tende ad abbassare il proprio centro di massa forzando il contatto. La tensione superficiale ovviamente si oppone alla formazione di tale area che aumenterebbe la superficie della goccia**.**

Distinguiamo due casi

a) Se il raggio è superiore alla lunghezza di capillarità, la gravità è dominante e la goccia assume l'aspetto di una calotta. Il moto risultante lungo un piano inclinato è asintoticamente stazionario, con una velocità terminale indipendente dalle dimensioni della goccia e dipendente solo dal grado di viscosità e dall'angolo di inclinazione

b) Se il raggio è inferiore alla lunghezza di capillarità, si ottiene invece un risultato controintuitivo: più piccola è la goccia, più velocemente essa rotola, diversamente da quanto accade per le gocce più piccole sulle usuali superfici. E' un attrito estremamente anomalo anche perché normalmente sfere viscose[4] che si muovono sotto l'azione della gravità seguono una legge di Stokes, cioè la velocità aumenta con l'incrementarsi delle dimensioni. Il tutto è dovuto al fatto che le liquid marbles sono '*soft solids'* per cui anche se l'angolo di contatto è di 180 ° c'è comunque una leggera deformazione che genera una regione di contatto col substrato proporzionale ad R^2. Se la velocità non è eccessivamente elevata, la dissipazione interna del fluido (attrito viscosa) che ha un' azione frenante, ha luogo solo nella zona di contatto. Le gocce più larghe hanno un'area di contatto maggiore che va incrementandosi molto più velocemente del volume e ciò causa un attrito estremamente più elevato, mentre piccole perle viscose (di miele o glicerolo) si comportano come sfere solide in rotazione, minimizzando la dissipazione viscosa e corrono giù per il piano inclinato raggiungendo talvolta velocità paragonabili ad un attrito nullo! La velocità terminale costante si ottiene dal bilanciamento della forza gravitazionale con l'attrito viscoso ed è, a parità di

[4] N.B. La viscosità è determinante: se è piccola (ad es acqua) la velocità aumenta all'aumentare del raggio!

inclinazione e viscosità, inversamente proporzionale al raggio Tanto per avere un' idea, mentre normalmente una goccia millimetrica 10^3 volte più viscosa dell'acqua, quale il glicerolo, striscia lungo un piano inclinato ad una velocità di 1 mm/s – 1 cm/s , perle delle stesse dimensioni e viscosità corrono da 100 a 1000 volte più velocemente (circa 1 m/s). A tali risultati apparentemente contraddittori erano già arrivati studi teorici, ma fino a poco tempo fa tali risultati non erano stati mai testati sperimentalmente.

Normalmente per produrre il movimento delle liquid marbles si sfrutta il campo gravitazionale, ma è possibile utilizzare anche deboli campi elettrici o magnetici. Ad esempio è stato esplorato l'effetto di un campo elettrostatico avvicinando ad una perla liquida appoggiata su di un substrato metallico (ma il materiale non risulterebbe determinante) una bacchetta di Teflon caricata per strofinamento: tale avvicinamento induce un movimento della goccia variabile a seconda della distanza goccia bacchetta. Alcuni ricercatori australiani stanno poi attualmente studiando 'liquid marbles' rivestite di nanogranuli (circa 10 nm) di magnetite superidrofobica che possono essere guidate da campi magnetici ciò potrebbe permettere di aprire e chiudere le gocce manipolandole in modo controllato tramite un dispositivo elettronico.

Ulteriori materiali di approfondimento

Una serie di materiale divulgativo

- Michael Nosonovsky, Bharat Bhushan - *"Green Tribology: Biomimetics, Energy Conservation and Sustainability"*, Springer 2012
- Una possibile applicazione di coating superidrofobici e superfici nanostrutturate per la raccolta d'acqua potabile
- Magnetic **liquid marbles** as an alternative to microchannel fluidics- Nanowerk (February 2010)
- Liquid metal marbles as a novel platform for developing soft electronics Nanowerk blog (August 2012)

Una serie di articoli di ricerca

- Properties of liquid marbles P. Aussillous e D. Quèrè
- Non–Stick Droplets P. Aussillous e D. Quèrè
- Michael A Nilsson, Robert J Daniello and Jonathan P Rothstein A novel and inexpensive technique forcreating superhydrophobic surfaces usingTeflon and sandpaper J. Phys. D: Appl. Phys. 43 (2010)
- *Advanced Materials* ("Magnetic Liquid Marbles: Manipulation of Liquid Droplets Using Highly Hydrophobic Fe_3O_4 Nanoparticles"), Tong

Video

- Brevi ma bellissime videoclip sulle superfici superidrofobiche e le biglie liquide *http://wn.com/Water_droplets_on_a_superhydrophobic_*surface

.