

Le forze intermolecolari e gli stati condensati attraverso l'angolo di contatto

Rosa di Mundo

Liceo Scientifico e Artistico "G. Galilei" di Bitonto (BA)

e-mail: rosa.dimundo@lsgalilei.eu; rosadimundo@gmail.com

Abstract. This paper shows methodologies and results of a laboratory course in the frame of the POC program addressed to scientific high school students. The main objective of the activity was the use of contact angle measurements in a simple and easy to handle mode to explore surface properties of liquids and solids and search correlations with intermolecular forces. As a final task students have fabricated a superhydrophobic wood surface and have been guided in the interpretation of this extreme interface behavior.

Keywords: angolo di contatto; acqua; forze intermolecolari; legno superidrofobo; effetto loto

1. Introduzione

L'energia superficiale è una proprietà della materia ampiamente esplorata nella ricerca scientifica e tecnologica. Basti pensare ai numerosi lavori prodotti negli ultimi anni per comprendere il comportamento di materiali superidrofili o superidrofobi sia presenti in natura [1] sia al fine di fabbricarli artificialmente con numerose tecniche [2, 3]. Per contro, nella didattica liceale questo argomento è trattato solo marginalmente: sui testi più utilizzati, qualora presente, è riportato a margine delle sezioni dedicate alle forze intermolecolari. Ad esempio, si parla di tensione superficiale in riferimento alle forze intermolecolari esistenti nello stato liquido in correlazione ad altre proprietà come la tensione di vapore o la viscosità. In questo contesto è definita come la tendenza delle molecole della superficie a lasciarsi attrarre verso l'interno ed è tanto maggiore quanto più intense sono le forze attrattive tra le molecole del liquido [4].

Le forze intermolecolari costituiscono un cardine nell'insegnamento della chimica in quanto forze alla base della coesione della materia e, pertanto, sarebbe opportuno organizzare forme di sperimentazione adatte all'ambito liceale per rafforzarne l'apprendimento.

La tecnica dell'angolo di contatto è di uso comune nei laboratori di ricerca in cui si pratica la caratterizzazione chimico-fisica delle superfici solide e dei liquidi. L'angolo di contatto è la misura dell'angolo formato all'interfaccia tra un liquido, un solido e un gas (o un altro liquido). È definito dall'equazione di Young, la relazione matematica che definisce l'angolo di contatto ideale in base alle tensioni interfacciali tra solido, liquido e vapore [5]. È stato mostrato come da questa relazione discenda la possibilità di ottenere informazioni indirette sull'energia superficiale del liquido poiché, a parità di superficie solida, l'angolo di contatto diminuisce al diminuire dell'energia superficiale del liquido.

Ancora più sfruttata è la possibilità di determinare indirettamente l'energia superficiale del solido dal momento che uno stesso liquido mostra angoli di contatto più bassi su superfici con maggiore energia superficiale. Questa tematica offre notevoli potenzialità didattiche, ma difficilmente può essere trattata nella didattica curricolare di un liceo. Per tali ragioni ho realizzato un percorso laboratoriale sul tema, nell'ambito del progetto "Scienze Lab" del Programma Operativo Complementare (POC) 2025-26, svoltosi in orario pomeridiano, a dicembre 2025, con 20 studenti di classi diverse del terzo e quarto anno.

Agli studenti ho proposto un approccio semplice alla tecnica dell'angolo di contatto, al fine di indagare differenze nel comportamento dei liquidi e dei solidi che potessero poi essere interpretate in base

alle conoscenze acquisite sulle forze intermolecolari. Una volta appreso il metodo di misura e alcune sue potenzialità, è stato proposto un esperimento di fabbricazione di materiale superidrofobo (effetto Loto) realizzabile in un laboratorio didattico.

2. Metodologia e materiali

Il percorso laboratoriale è progettato in modo da risultare facilmente fruibile dagli studenti liceali del terzo anno che abbiano già affrontato il legame chimico, il concetto di polarità, le forze intermolecolari e la diversa intensità che possono presentare. I ragazzi hanno lavorato in gruppi di due-tre in attività organizzate secondo una metodologia di apprendimento attivo: dopo una breve presentazione, hanno lavorato autonomamente muniti di un foglio di lavoro con alcune essenziali indicazioni, tabelle per la raccolta dati e domande/stimoli all'interpretazione personale, da riportare sullo stesso foglio e da usare come base per dei momenti di discussione collettiva.

L'angolo di contatto è stato misurato con il metodo della goccia sessile, cioè analizzando il profilo di una goccia depositata su una superficie [6, 7]. A questo scopo sono state utilizzate pipette monouso o Pasteur per depositare delicatamente piccole quantità di liquido (diametro della goccia non superiore ai 2-3 mm) che sono state poi riprese frontalmente con un dispositivo con funzione di fotocamera come un tablet o, qualora permesso, uno smartphone. L'immagine è stata elaborata con applicazioni disponibili in rete (Angle Meter o similari) idonee a misurare l'angolo tra l'interfaccia solido-liquido e la tangente al profilo della goccia nel punto in cui interseca la superficie. (Figura 1).

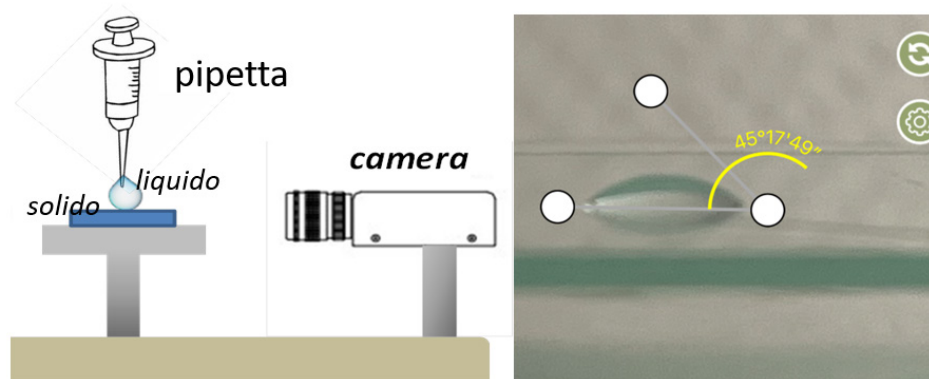


Figura 1. Schema del sistema di misura dell'angolo di contatto, usando come fotocamera un tablet posizionato per una ripresa frontale; nell'immagine a destra un esempio di elaborazione dell'immagine della goccia mediante un'applicazione per la misura di angoli

La misura, per rispettare una gradualità didattica, è stata effettuata solo in modalità statica, sebbene ulteriori informazioni potrebbero derivare da misure con la goccia in movimento [7]. I valori riportati sono mediati su almeno tre misurazioni considerando un'incertezza massimo-minimo di 4°.

Il percorso è stato articolato in tre fasi.

- 1) Confronto tra liquidi: misura di angolo di contatto per acqua distillata, etanolo ed esano (Sigma-Aldrich) su una superficie solida di riferimento.
- 2) Confronto tra superfici solide: misura di angolo di contatto di acqua su diversi materiali solidi per testarne il carattere idrofilo o idrofobo.
- 3) Fabbricazione di una superficie con effetto loto.

Nella seconda fase i materiali solidi utilizzati sono vetro (vetrino portaoggetti), marmo di Carrara levigato, plastica poliolefinica (Parafilm), alluminio (foglio di alluminio laminato) e legno (essenza di rovere, non trattato). Le superfici di tali materiali sono state analizzate così come ricevute nel loro confezionamento, dopo aver riscontrato l'assenza di macchie o irregolarità macroscopiche.

Nella fase di fabbricazione è stata usata una soluzione spray, parte di un kit didattico della Advanced Materials Science, consigliato per superfici porose, legno o pietra. La soluzione spruzzata è stata lasciata asciugare per 24 ore. Uno stereoscopio digitale (Celestron 44308) è stato utilizzato per osservare la superficie del legno.

3. Risultati

In figura 2a è possibile osservare la differenza tra l'assetto della goccia sul vetrino portaoggetti nel caso di acqua distillata, etanolo ed esano. Il vetro è quindi usato come superficie solida di riferimento per la sua stabilità chimica e per la sua superficie particolarmente liscia. La misura del valore dell'angolo di contatto è al limite della fattibilità per l'etanolo e l'esano, dato il pronunciato spandersi del liquido sulla superficie; tuttavia, per l'etanolo è possibile rilevare una lieve inclinazione nel profilo del liquido alla quale si può attribuire un valore di 5° , mentre per l'esano si osserva uno spandimento completo del liquido depositato al quale è stato assegnato un valore di 0° . Per l'acqua, invece, gli studenti hanno rilevato una netta differenza registrando un angolo di contatto di 45° . Hanno così apprezzato in modo diretto una proprietà dei liquidi di cui si può far esperienza nel quotidiano, ma su cui difficilmente si focalizza l'attenzione. Gli studenti sono stati poi stimolati a interpretare i risultati cercando una correlazione con le forze intermolecolari da loro studiate nel corso curricolare di Scienze Naturali.

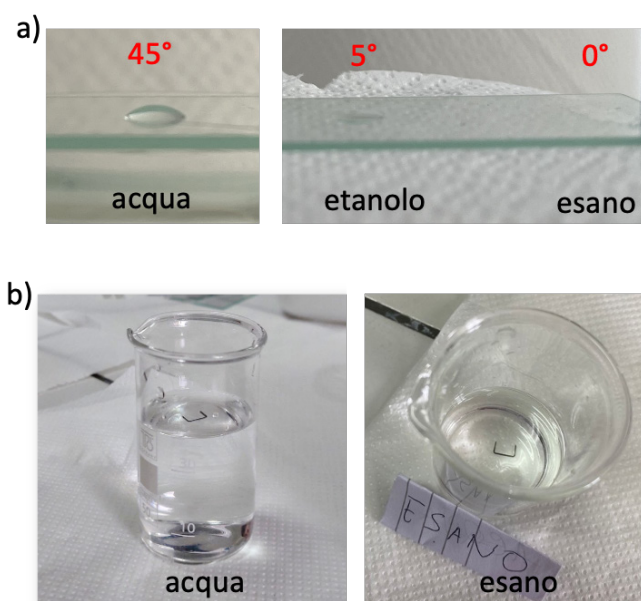


Figura 2. a) Immagini delle gocce di acqua, etanolo ed esano su vetrino porta-oggetti con l'indicazione dell'angolo di contatto misurato; b) test della spilla appoggiata sulla superficie del liquido nel caso dell'acqua e dell'esano

Sul foglio di lavoro è stata posta la domanda *Come interpreti questi risultati? Pensi possa esistere una correlazione con le forze intermolecolari? Elabora una risposta motivata.*

Molti hanno motivato la risposta pensando all'acqua come la sostanza che presenta allo stato liquido la forza intermolecolare più forte e riportano una scala di forze a partire da quella più intensa: legame idrogeno > forza dipolo-dipolo > forze di London. Il momento di discussione comune è poi servito a spiegare che in effetti anche nell'etanolo esiste un legame idrogeno, ma meno forte rispetto all'acqua dato che la molecola presenta una parte anche apolare. Una prova empirica di tensione superficiale (ad alcuni già nota) si è avuta osservando cosa succede appoggiando una sottile spilla di ferro sulla superficie dell'acqua e dell'esano: nel primo caso galleggia, mentre nel secondo affonda (Figura 2b).

Nella seconda fase dell'esperienza si è utilizzata l'acqua come liquido di riferimento per testare la diversa adesione su materiali diversi, effettuando dunque prove di misura di angolo di contatto con acqua, *water contact angle* (WCA). I risultati ottenuti sono visibili nelle foto riportate in figura 3, utilizzate per la misura e poi rappresentati nell'istogramma di figura 4.

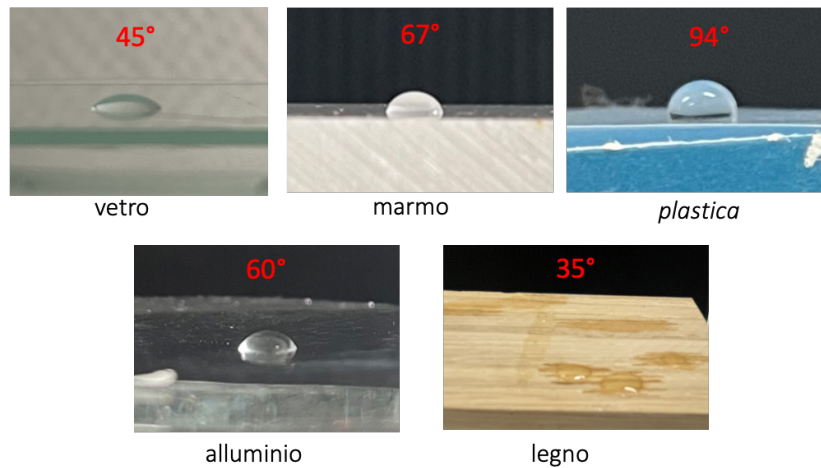


Figura 3. Immagini per la misura dell'angolo di contatto con acqua di superficie di vetro, marmo (marmo di Carrara), plastica (polimero poliolefinico, parafilm), alluminio (pellicola in alluminio per alimenti), legno (rovere)

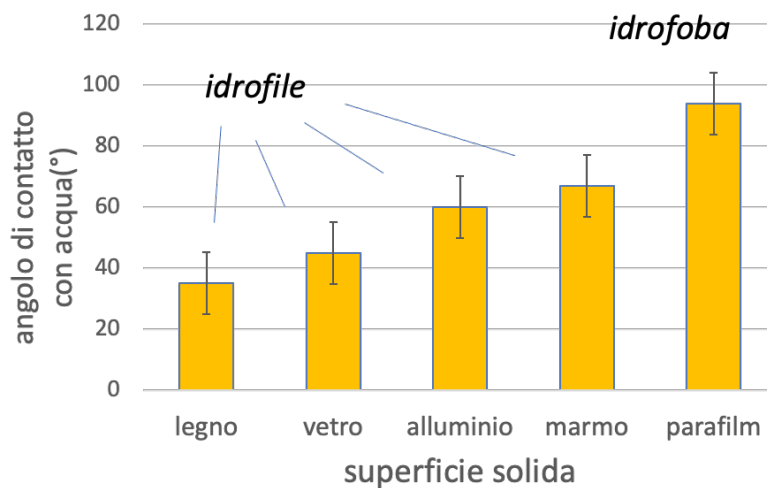


Figura 4. Istogramma dei valori di angolo di contatto con acqua per i materiali solidi esaminati

Si osserva come l'alluminio e il marmo diano gocce dal profilo simile a quella del vetro, sebbene con differenze significative di valori (rispettivamente 60 e 67°); sul legno si osserva, invece, un angolo più basso e, nel tempo, un assorbimento della goccia; infine, sul polimero plastico il valore osservato è nettamente più elevato (94°).

Sulla scheda di lavoro agli studenti è stato fornito lo schema di figura 5 che, in base al valore di angolo di contatto con acqua, suddivide le superfici solide in superidrofile, idrofile, idrofobe e superidrofobe; in questo modo gli studenti sono in grado di valutare il comportamento dei materiali presi in considerazione, riportandolo sul foglio di lavoro (e poi sull'istogramma). Il vetro, il marmo, l'alluminio, il legno possono essere considerati idrofilo, mentre solo il materiale plastico risulta idrofobo.

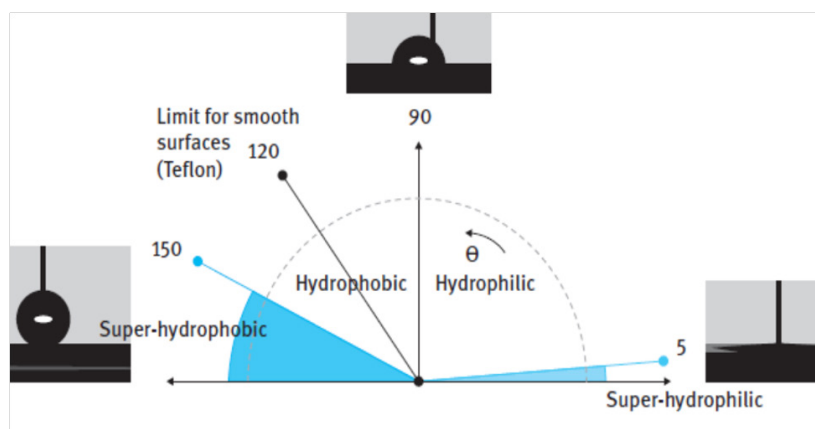


Figura 5. Classificazione delle superfici in base al valore dell'angolo di contatto osservato usando acqua

A questo punto gli studenti sono stati nuovamente stimolati a interpretare le differenze evidenziate elaborando una risposta motivata alle domande: *Come puoi spiegare il diverso comportamento idrofobo/idrofilo dei materiali osservati? Puoi interpretarlo in base alle forze intermolecolari?*

Le risposte fornite e la successiva discussione hanno mostrato una diffusa incertezza, probabilmente dovuta alla scarsa conoscenza del legame nello stato solido. Le risposte sono rimaste su un piano più generico rilevando che nel caso del materiale plastico si desume una bassa adesione tra la sua superficie e l'acqua. Nella discussione, l'interpretazione dei risultati è stata guidata presentando le caratteristiche dei legami nei solidi analizzati; in particolare, è stata messa in luce la struttura molecolare del polimero poliolefinico, facendo leva sulla conoscenza posseduta dai ragazzi sul carattere apolare delle catene idrocarburiche.

L'ultima fase del percorso, come detto, è stata dedicata alla realizzazione di una superficie superidrofoba o superficie con effetto loto. A questo scopo è stato utilizzato uno spray indicato come rivestimento per legno o pietra; si tratta di una miscela di polisilossanici, fluoroalchilici e idroformiati consigliata nel kit didattico per materiali porosi per il cui uso, in questo caso specifico, non è stata fornita una spiegazione, perché la motivazione doveva emergere solo successivamente alla realizzazione dell'esperienza. La soluzione è stata dunque spruzzata su un campione di legno della stessa tipologia di quello già analizzato, avendo cura di ricoprire tutta la superficie (cosa facilmente verificabile per l'effetto bagnato lasciato dallo spray); dopo il trattamento il campione è stato fatto asciugare per 24 h. Contestualmente, la stessa procedura è stata applicata a un vetrino, come superficie di controllo.

In figura 6 sono riportate le immagini e i relativi valori di angolo di contatto con acqua per il legno (a sinistra) e per il vetro (a destra) trattati con lo spray.

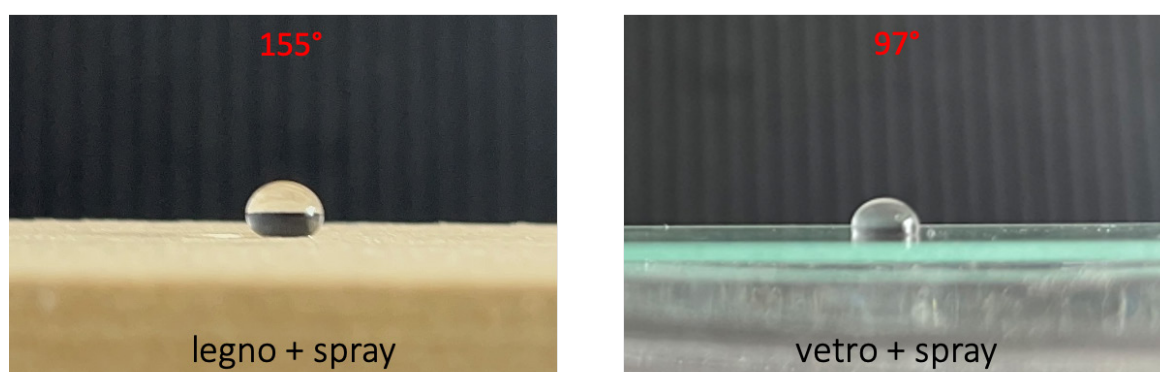


Figura 6. Goccia d'acqua e misura dell'angolo di contatto su legno (sinistra) e vetro (destra) trattati con lo spray

Il risultato sul legno ha sorpreso gli studenti sia per la quasi sfericità della goccia, sia per l'angolo pari a 155° , che permette di classificare la superficie come superidrofoba, sia per l'instabilità della stessa goccia che tendeva a scivolare via dalla superficie al minimo movimento del campione (effetto loto [2, 8]). Come detto, le misure di angolo di contatto sono state effettuate solo in modalità statica, ma questa ulteriore osservazione dinamica ha permesso di rendere più tangibili aspetti applicativi, come il carattere autopulente, antimacchia, impermeabile. Il confronto con il valore riscontrato sul vetro (solo 97°) trattato nello stesso modo ha permesso di spiegare la modalità di funzionamento di tale rivestimento. In questo caso, data la difficoltà, è stata posta la seguente domanda, più circostanziata: *Ammettendo che il rivestimento ricopra completamente il profilo della superficie solida, come puoi spiegare che il legno sia notevolmente più idrofobo?* I ragazzi sono stati, quindi, guidati nel ragionamento inducendoli a focalizzare l'attenzione sul profilo che assume una goccia d'acqua a contatto con l'aria (tende a curvarsi) e sulla diversa morfologia della superficie del legno e di quella del vetro, cioè costituzionalmente porosa la prima e compatta e liscia la seconda.

La figura 7a riporta un'immagine del campione di legno trattato che gli studenti hanno ottenuto con lo stereoscopio digitale in dotazione nel laboratorio.

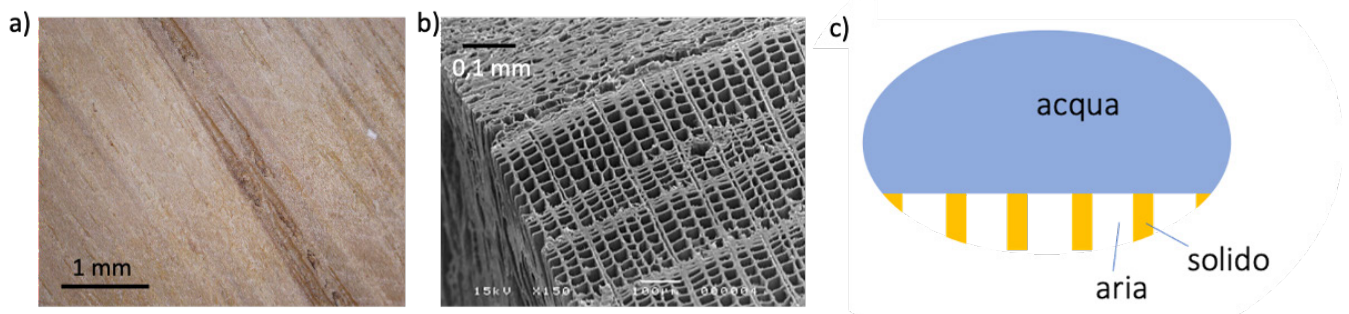


Figura 7. a) Immagine della superficie di legno con stereoscopio digitale; b) immagine una ottenuta con microscopio elettronico a scansione che rivela la porosità micrometrica (<https://it.wikipedia.org/wiki/Legno>); c) uno schema interpretativo semplificato dell'effetto superidrofobo

Con questo tipo di osservazione microscopica la superficie del legno trattato appare indistinguibile da quello del legno non trattato. L'immagine, sebbene ripresa dall'alto, rivela la presenza di protrusioni e avvallamenti sub-millimetrici ai quali, però, devono aggiungersi porosità micrometriche, tipicamente presenti nel tessuto vascolarizzato del legno, come è possibile osservare in immagini da microscopio elettronico presenti in rete (un esempio in figura 7b) e ricercate con i ragazzi. Questa particolare porosità è responsabile dell'assorbimento di acqua nel legno non trattato (idrofilo), mentre nel legno modificato con lo spray (quindi, reso idrofobo) l'acqua non riesce a penetrare e, pertanto, la sua superficie a livello microscopico è una mescolanza di solido e aria (schema in figura 7c): è la presenza di aria ad amplificare il carattere idrofobo (fino a superidrofobo) del legno trattato, come è spiegato da innumerevoli studi noti ai ricercatori nel campo dei materiali superidrofobi [8, 9].

4. Conclusione

In questo lavoro sono stati presentati i risultati di un percorso laboratoriale svolto nell'ambito dei progetti POC (percorsi complementari di Orientamento 2024-2025) realizzati nel liceo scientifico e artistico G. Galilei di Bitonto. Il percorso ha offerto la possibilità di esplorare proprietà dei materiali e relativi metodi di indagine, che difficilmente vengono presentati nelle attività curricolari, e, quindi, ha costituito sia un'occasione di ampliamento e potenziamento formativo, sia un'opportunità di orientamento rispetto al campo della ricerca scientifica e tecnologica. In particolare, ho

proposto un metodo di semplice applicazione per la misura dell'angolo di contatto che, sebbene non offra le prestazioni precise e potenti delle strumentazioni professionali, permette comunque di ricavare alcune informazioni basilari sull'energia superficiale di solidi e liquidi, che i ragazzi possono cercare di correlare alle conoscenze teoriche sulle forze intermolecolari. La sperimentazione effettuata stimola all'osservazione invitando a rilevare/misurare fenomeni ubiquitari nella vita quotidiana (il profilo di una goccia di liquido su di una superficie), su cui spesso non si pone attenzione, e incoraggia a trovare modalità autonome di indagine. La parte finale del percorso, dedicata alla fabbricazione di un legno superidrofobo ha consentito di mostrare in forma elementare come le conoscenze acquisite nella ricerca possono essere sfruttate per ottenere applicazioni e prodotti innovativi.

Ringraziamenti

Il progetto "Scienze Lab" è stato possibile grazie al Programma Operativo Complementare (POC) "Per la scuola 2014-2020", Obiettivo specifico 10.1, Azione 10.1.6 "Azioni di orientamento, di continuità e di sostegno alle scelte dei percorsi formativi, universitari e lavorativi".

Un sentito grazie agli alunni del liceo Galilei che si sono cimentati nel percorso arricchendolo di curiosità e stimoli per progetti futuri.

Riferimenti bibliografici

- [1] W. Barthlott, C. Neinhuis, Purity of the sacred lotus, or escape from contamination in biological surfaces, *Planta*, 1997, **202**, 1-8.
- [2] R. Di Mundo, F. Bottiglione, G. Carbone, Cassie state robustness of plasma generated randomly nano-rough surfaces, *Appl. Surf. Sci.*, 2014, **316**, 324-332.
- [3] A. J. Meuler, J. D. Smith, K. K. Varanasi, J. M. Mabry, G. H. McKinley, R. E. Cohen, Relationships between water wettability and ice adhesion, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2010, **2**, 3100-3110.
- [4] G. Valitutti, P. Amadio, M. Falasca, *Chimica: concetti e modelli*, (terza edizione), Zanichelli, Bologna, 2023.
- [5] T. R. Young, An assay on the cohesion of fluids, *Philos. Trans. Soc. R. Lond.*, 1805, **95**, 65-87.
- [6] L. Sabbatini, et al., *Polymer surface characterization*, Berlin/Boston, De Gruyter, 2014.
- [7] R. Di Mundo, F. Palumbo, Comments regarding 'an essay on contact angle measurements', *Plasma Process. Polym.*, 2010, **8**, 14-18.
- [8] D. Quéré, Non-sticking drops, *Rep. Prog. Phys.*, 2005, **68**, 2495-2532.
- [9] A. B. D. Cassie, S. Baxter, Wettability of porous surfaces, *Trans. Faraday Soc.*, 1944, **40**, 546-551.

