

---

# Nanomateriali a base di carbonio per la rimediazione ambientale

**Antonio Turco**

*Dipartimento di Scienze e Tecnologie Biologiche e Ambientali, Università del Salento*

---

**L**a contaminazione da parte di sostanze nocive delle risorse idriche è uno dei più gravi problemi della nostra società. Numerosi sistemi acquatici sono stati e vengono tuttora contaminati da specie organiche ed inorganiche derivanti dai rifiuti prodotti da attività antropiche come ad esempio quelle collegate all'industria, all'agricoltura e alle attività domestiche. Di conseguenza sia il trattamento di rifiuti che la decontaminazione di bacini acquosi contaminati è una delle sfide più importanti a livello ambientale. In quest'ottica l'adsorbimento fisico rappresenta una delle tecniche più promettenti per la rimozione di qualunque tipo di inquinante. In particolare due materiali a struttura grafica come i nanotubi di carbonio e il grafene hanno attirato un grande interesse in questo ambito della ricerca per le loro uniche proprietà chimico-fisiche. Opportunamente modificati, tali materiali sono capaci di intrappolare numerosi inquinanti in maniera selettiva ed efficiente rappresentando una delle maggiori speranze per lo sviluppo di materiali innovativi e ad alto tasso tecnologico per la purificazione di matrici acquose

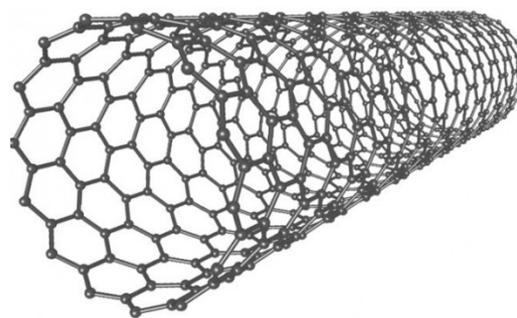
contaminate.

## Introduzione

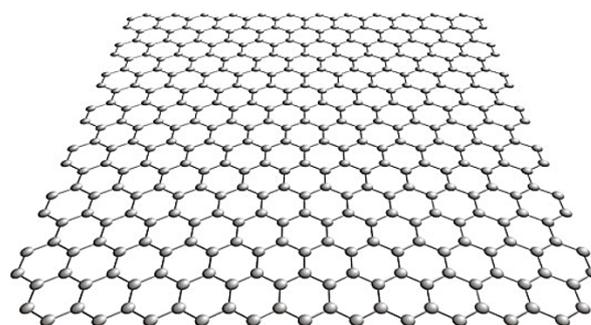
A causa del crescente aumento della popolazione e dell'industrializzazione, la carenza di acque pulite ed utilizzabili per le necessità primarie sta diventando un problema diffuso in tutto il mondo. Diviene pertanto necessario lo sviluppo di nuove ed efficienti tecnologie per la decontaminazione di acque di scarico industriali, così come per la dissalazione delle acque marine e salmastre. Giusto per dare un'idea della gravità della situazione, si è arrivati al punto che quasi il 50% della popolazione mondiale, una buona parte di questa concentrata soprattutto in Asia ed in Africa, si trova a fronteggiare una grave emergenza relativa alla scarsità di acque sicure da utilizzare per le attività quotidiane. Per tutte queste ragioni, la tutela dell'ambiente e delle acque sta diventando una delle maggiori preoccupazioni della società. Al fine di risolvere tali problemi sono state emanate a livello mondiale numerose leggi volte a controllare lo scarico di rifiuti industriali acquosi nell'ambiente; tuttavia molti rifiuti vengono ancora oggi illegalmente scaricati nelle acque ed altri, come ad esempio le acque di vegetazione olearie derivate dalla produzione dell'olio d'oliva, sebbene siano tossici non hanno ancora una regolamentazione efficace

per prevenire la loro immissione nell'ambiente. Per questo motivo la ricerca scientifica sta concentrando i suoi sforzi sulla produzione di materiali a basso costo e ad alta efficienza per la rimozione di inquinanti dalle acque.

Tra i vari materiali utilizzati per questi scopi, alcune nuove forme di carbonio come i nanotubi di carbonio ed il grafene (Fig.1) hanno attratto, sin dalla loro recente scoperta, l'attenzione della comunità scientifica. I nanotubi di carbonio [1] sono un materiale con caratteristiche fisiche e chimiche eccezionali che ne permettono l'applicazione in numerosi campi della ricerca come l'elettronica, la sensoristica, l'ingegneria dei materiali, e hanno inoltre recentemente trovato ampio campo di applicazione nella rimediazione ambientale. Tali materiali sono costituiti da uno o più fogli di carbonio grafiteo, una forma di carbonio (o allotropo) identica a quella che costituisce le matite. Questi foglietti sono ripiegati su loro stessi a formare una struttura tubulare con un diametro solitamente compreso tra pochi e decine di nanometri ed una lunghezza di centinaia di micron; ciò permette di avere un elevato rapporto superficie/volume e quindi un'ampia area di scambio per l'adsorbimento di specie chimiche inquinanti dalle soluzioni. Oltre ciò la superficie dei nanotubi di carbonio può essere facilmente modificata chimicamente al fine di rendere il materiale selettivo per l'adsorbimento di specifiche molecole di interesse. Il grafene invece ha la stessa composizione chimica dei nanotubi di carbonio, ma con gli atomi disposti in un singolo foglio con struttura planare [2]. (si veda Fig.1) Mediante ossidazione del grafene è possibile ottenere l'ossido di grafene che attualmente rappresenta il miglior intermedio di reazione necessario per la produzione in larga scala di grafene. In passato, per la sintesi di grafene, i premi Nobel del 2010 Andre Geim e Konstantin Novoselov, utilizzarono del nastro adesivo con il quale *esfoliarono* un pezzo di grafite sino ad ottenere un foglietto costituito da un singolo strato di atomi di carbonio. Da allora sono stati messi a punto diversi metodi di sintesi del grafene, ma ad oggi il metodo più efficace che permette una produzione in più larga scala, consiste nell'ossidare la grafite in opportuni solventi sotto l'azione di forze esterne come ad esempio processi a base di ultrasuoni. Il grafene ossidato così ottenuto



Nanotubo di carbonio



Grafene

**Figura 1:** Rappresentazione schematica della struttura di nanotubo di carbonio e grafene.

può poi essere ridotto a grafene mediante ulteriori trattamenti chimici. Anche il grafene, così come i nanotubi di carbonio, ha evidenziato proprietà uniche dal punto di vista chimico-fisico e il forte interesse nella sua applicazione nell'ambito della rimediazione ambientale è dovuto alle stesse motivazioni già descritte per i nanotubi di carbonio.

## Assorbimento di oli e solventi organici

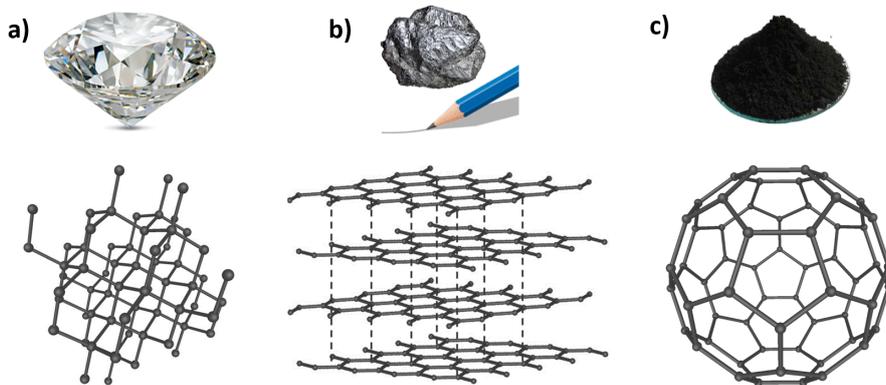
Negli ultimi decenni numerosi sono stati gli incidenti che hanno visto lo sversamento di petrolio nelle acque marine. Ad esempio nel 2010 un incidente nel golfo del Messico ha portato alla dispersione di 4.9 milioni di barili di petrolio portando alla morte di numerose specie animali. La dispersione di oli in acqua risulta essere molto più pericolosa di quanto avviene sulla terraferma, in quanto numerosi tipi di oli galleggiano

## Forme allotropiche del Carbonio

Il termine allotropia deriva dal greco *allos* (altro) e *tropos* (modo) e viene utilizzato per identificare quegli elementi che allo stato molecolare possono trovarsi in due o più forme diverse tra loro (definite allotropi) caratterizzate da diverse proprietà chimico-fisiche. Gli elementi che possono presentare forme allotropiche sono boro, stagno, fosforo, zolfo, selenio, ossigeno e carbonio. Tra questi le forme allotropiche del carbonio (diamante, grafite, grafene, fullerene, nanotubi) sono quelle che più hanno attirato l'attenzione degli scienziati (Fig.2). Queste sono caratterizzate da strutture chimiche ben definite aventi diversi tipi di legami tra gli atomi. Nel diamante, ad esempio, ogni atomo di carbonio è legato ad altri quattro atomi disposti ai vertici di un tetraedro conferendo al cristallo una straordinaria durezza. Nella grafite, invece, ogni atomo di carbonio è legato ad altri tre atomi formando esagoni regolari assemblati in strutture planari, tenute insieme, una impilata all'altra, da forze di legame deboli. Un singolo foglietto isolato di grafite prende il nome di grafene. Nel fullerene invece il carbonio è assemblato a formare una struttura icosaedrica composta da 60 atomi di carbonio legati in modo da formare 12 facce pentagonali e 20 facce esagonali strutturalmente simili a quelle che compongono i palloni da calcio con le cuciture.

sull'acqua e quindi possono rapidamente espandersi dall'area dell'incidente a quelle limitrofe, fenomeno tra l'altro favorito da vento e moto ondoso, minacciando di conseguenza ampie aree di habitat naturali. Per questo motivo la comunità scientifica è alla ricerca di metodi innovativi che possano ridurre o eliminare del tutto in tempi molto rapidi le quantità di oli presenti in acque a seguito di sversamenti. Attualmente, per tali scopi, si usano tre tipi di approcci che sono di tipo fisico, chimico e biologico. Per gli approcci fisici si utilizzano sorbenti sintetici [3, 4] capaci di assorbire l'olio. L'approccio chimico prevede invece l'utilizzo di sostanze disperdenti

o la combustione degli oli *in situ*, tuttavia questo metodo può portare alla produzione di ulteriori inquinanti. Infine l'approccio di tipo biologico detto anche biorimediazione prevede l'utilizzo di batteri capaci di trasformare gli idrocarburi in sostanze meno tossiche il problema è però che tale approccio risulta essere molto lento. Tra tutte le tecniche quindi l'assorbimento di tipo fisico risulta essere la strategia migliore e ad oggi quella più studiata anche grazie al fatto che possono essere prodotti materiali non tossici per l'ambiente in maniera abbastanza semplice e rapida e con una buona riciclabilità. In quest'ottica, materiali che posseggono caratteristiche di superidrofobicità (alta repulsione all'acqua) e superoleofilicità (alta capacità di essere bagnati dagli oli) sono dei candidati promettenti in quanto capaci di assorbire gli oli e i solventi organici, respingendo l'acqua. Diversi materiali di origine naturale e/o sintetica sono stati utilizzati per questi scopi, ciononostante molti di questi materiali hanno evidenziato scarse capacità di assorbimento, riciclabilità e selettività. Per tale motivo, negli anni più recenti la comunità scientifica si è rivolta all'utilizzo di nanomateriali a base di carbonio, in particolare nanotubi di carbonio e grafene, per l'assorbimento di oli da acque contaminate. I vantaggi nell'utilizzo di tali materiali risiedono nella loro elevata resistenza meccanica e chimica, superidrofobicità, superoleofilicità e rapida capacità di assorbimento. È stato visto in particolare come sia il grafene che i nanotubi di carbonio, possono assorbire in maniera selettiva quantità di oli pari a decine di volte il loro peso. Tuttavia, uno dei principali problemi nel loro utilizzo è che entrambi sono solitamente prodotti in forma di polvere, la cui gestione diviene difficile se si pensa ad un loro utilizzo in contesti come quello marino. I nanomateriali a base di carbonio infatti una volta dispersi nell'ambiente se non recuperati completamente potrebbero risultare tossici per l'ecosistema. Al fine di ovviare a tali problemi sono state attuate diverse strategie: ad esempio i nanotubi di carbonio sono stati prodotti in forma di spugna porosa mediante particolari procedure di sintesi, tuttavia le strategie ad oggi più utilizzate, anche per la loro semplicità, prevedono di produrre materiali spugnosi combinando i nanomateriali a struttura grafitica con polimeri sia naturali che artificiali. In questo modo è sta-



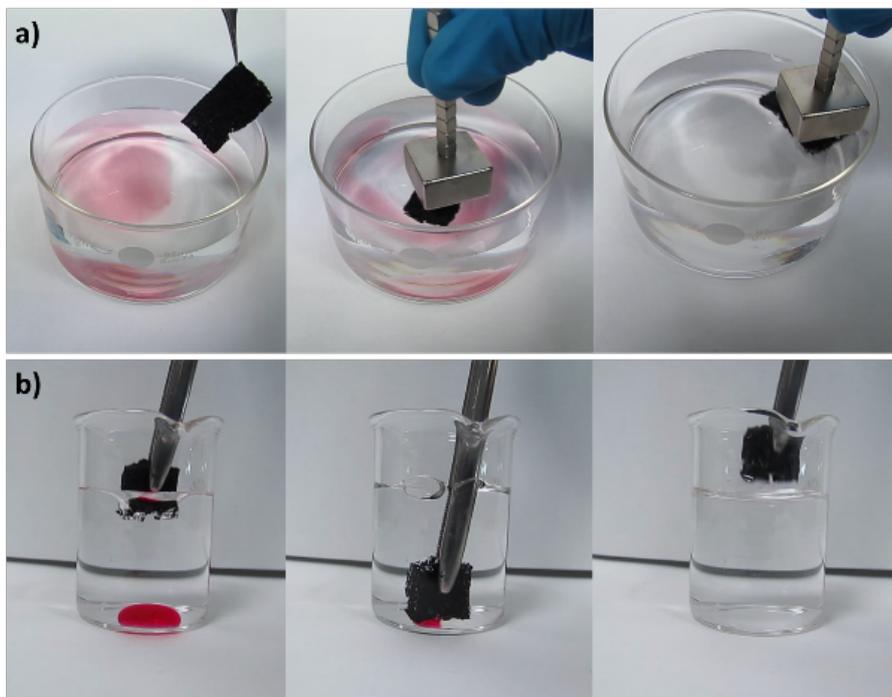
**Figura 2:** Struttura macroscopica e molecolare del a) diamante, b) grafite e c) fullerene.

to possibile ottenere dei nanocompositi in cui le proprietà dei polimeri utilizzati e dei materiali a base di carbonio si combinavano dando origine a nuovi materiali con proprietà incredibili. Ad esempio presso l'università del Salento sono state prodotte delle spugne combinando le proprietà di un polimero artificiale, il polidimetilsilossano, con i nanotubi di carbonio [5]. Combinando questi due materiali è stato prodotto, mediante opportune tecniche di fabbricazione, un polimero nanocomposito poroso superidrofobico e superoleofilo, che una volta in contatto con oli e solventi organici era in grado non solo di assorbirli, ma anche di aumentare il suo volume e di conseguenza la dimensioni dei pori, permettendo così l'assorbimento di maggiori quantità di olio (Fig.3). Il materiale dopo l'assorbimento di olio può inoltre essere spremuto meccanicamente al fine di permettere il recupero degli oli assorbiti ed il riutilizzo del nanocomposito per un nuovo ciclo di assorbimento senza perdere le sue capacità. Altri approcci prevedono invece di andare a rivestire materiali porosi polimerici con nanotubi di carbonio e/o grafene. Come nel caso delle spugne di poliuretano, sulla cui superficie vengono fatti adsorbire i nanomateriali a base di carbonio presenti in una soluzione in cui la spugna viene immersa. Sebbene l'approccio risulti estremamente semplice, la stabilità del materiale può essere compromessa rendendo alto il rischio di dispersione del nanomateriale nell'ambiente durante un'applicazione reale. Per tali motivi, molto spesso si usano ulteriori sostanze che possano agire da agenti cementificanti e che possano bloccare i nanomateriali sulla superficie della spugna. Questo però può portare alla riduzione dell'idrofobicità ed all'aumento dell'idrofilicità del nanomateriale a base di carbonio

a causa del rivestimento che si viene a creare sulla superficie. Un altro approccio molto interessante è la fabbricazione di aereogel, materiali porosi estremamente leggeri e quindi facilmente trasportabili. In particolare sono stati prodotti, con diversi metodi, aereogel sia di grafene che di nanotubi di carbonio capaci di assorbire selettivamente oli da acqua, ma quello su cui ci si sta concentrando recentemente è cercare di conferire migliori proprietà meccaniche a tali materiali. Infatti, spesso, le performance di assorbimento di questi aereogel diminuiscono a seguito dei diversi processi di spremitura necessari per rimuovere l'olio assorbito a causa della loro scarsa stabilità strutturale.

## Adsorbimento di inquinanti

I nanotubi di carbonio ed il grafene sono considerati tra i materiali più promettenti per l'adsorbimento di un ampio range di sostanze inquinanti organiche e inorganiche. Tali nanomateriali hanno infatti evidenziato migliori capacità rispetto ad altri sorbenti di più comune utilizzo come il carbonio attivo, le argille e le zeoliti in quanto sono capaci di stabilire interazioni fisiche e chimiche più forti con gli inquinanti permettendone un veloce adsorbimento. Inoltre la possibilità di modificarne chimicamente la superficie permette di controllare la selettività del materiale per determinate specie piuttosto che altre. Durante il processo di adsorbimento di molecole organiche diverse forme di interazioni possono avvenire contemporaneamente come ad esempio interazioni idrofobiche, interazioni  $\pi - \pi$  legami idrogeno e interazioni elettrostatiche. Come visto nel paragrafo precedente, la struttura grafite presente sulla superficie di nanotubi di carbonio



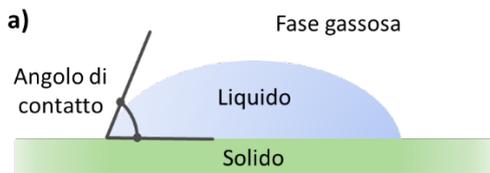
**Figura 3:** Rimozione di oli superficiali (a) e sommersi (b) con un materiale poroso a base di nanotubi di carbonio e polidimetilsilossano.

### Bagnabilità

La bagnabilità è il processo che porta a contatto un liquido ed una superficie solida (Fig.4). Il processo viene descritto attraverso la misura dell'angolo di contatto ( $\Theta$ ) formato dalla tangente all'interfaccia liquido-fase gassosa e dalla tangente alla superficie solida, in corrispondenza della linea di contatto tra le tre fasi. Valori di  $\Theta$  inferiori a 90 gradi descrivono una situazione in cui un solido è parzialmente bagnato dal liquido e che nel caso dell'acqua prende il nome di idrofilicità. Valori di  $\Theta > 90$  gradi descrivono invece una situazione in cui il solido è poco bagnato e che nel caso dell'acqua prende il nome di idrofobicità. Per valori di angolo di contatto con l'acqua inferiori ai 5 gradi o maggiori ai 150 gradi si hanno situazioni che vengono definite rispettivamente superidrofiliche o superidrofobiche. In maniera analoga è possibile definire anche i concetti di superoleofilicità e superoleofibicità. Un esempio di superidrofobicità è quello della foglia di loto che rimane asciutta e pulita proprio grazie alla sua superficie poco affine all'acqua.

e grafene a causa della scarsa polarità ha una forte affinità con idrocarburi (quali esano, benzene, cicloesano) piuttosto che con molecole polari. Attraverso la funzionalizzazione del nanomateriale solitamente, invece, si tende ad introdurre sulla sua superficie dei gruppi contenenti ossigeno andando così a diminuire la superficie utile per l'adsorbimento di sostanze non polari a favore di specie polari.

Questa strategia è stata utilizzata ad esempio per controllare l'adsorbimento di fenoli sulla superficie di nanotubi e grafene. I fenoli e polifenoli sono sostanze naturali presenti in numerosi alimenti che a basse concentrazioni hanno effetti benefici sulla salute, ma se presenti in grandi quantità, come spesso accade in alcuni rifiuti di produzioni alimentari, risultano tossici per microrganismi e piante andando a compromettere l'ecosistema. È stato visto come i nanomateriali a base di carbonio, una volta funzionalizzati con gruppi contenenti ossigeno, adsorbono da soluzioni acquose tali sostanze, e possono essere più o meno affini per un determinato tipo o classe di fenoli in base alla quantità di gruppi funzionali polari presenti sulla loro superficie [6]. Inoltre i fenoli adsorbiti possono essere facilmente recuperati dalla superficie del nanomateriale mediante opportuni trattamenti. In questo modo gli stessi fenoli possono essere utilizzati, ad opportune concentrazioni, per la produzione di



**Figura 4:** a) Rappresentazione schematica di un angolo di contatto. b) Superidrofobicità della foglia di loto.

alimenti arricchiti con effetti benefici sulla salute, trasformando di fatto un rifiuto in una risorsa. Oltre che per l'adsorbimento dei fenoli, nanomateriali a base di carbonio, opportunamente funzionalizzati sono stati ad esempio utilizzati per la rimozione da scarti industriali di coloranti, metalli pesanti, fenoli di origine sintetica come il bisfenolo A, interferenti endocrini, pesticidi ed antibiotici [7].

Ancora una volta però è bene ricordare come il fatto che tali materiali siano in forma di particelle dalle dimensioni nanometriche possa rappresentare un grosso problema per la loro applicazione per il trattamento di siti contaminati. Per tale motivo sono state messe in atto tutta una serie di strategie: un primo approccio è quello di impacchettare la fase adsorbente costituita da nanotubi di carbonio o grafene, all'interno di colonne, nelle quali viene spinta, mediante l'utilizzo di pompe ed in appositi impianti, la soluzione da purificare. Il metodo seppur semplice ed immediato è limitato alla decontaminazione di rifiuti industriali e richiede un grosso dispendio energetico. Gli stessi limiti sono stati evidenziati nel momento in cui sono state utilizzate invece di colonne impaccate, delle membrane formate da nanocompositi porosi, come sistemi di filtrazione. Inoltre, tali membrane possono andare incontro a fenomeni di intasamento richiedendo quindi una continua manutenzione/sostituzione. Un ulteriore approccio è invece rappresentato dalla possibilità di disperdere i nanomateriali a base di carbonio nell'ambiente acquoso contaminato per poi essere recuperati dopo la fase di adsorbimento. Tale strategia può semplificare e ridurre i costi energetici del processo di rimediazione, in quanto non è richiesto l'utilizzo di impianti dedicati, ma il problema in questo caso è rappresentato dal recupero completo della fase adsorbente nanostrutturata in modo da garantire che non venga dispersa nell'ambiente. Sebbene nei primissimi approcci utilizzati si prevedeva il recupero dei nanomateriali a base di carbonio mediante pro-

cessi di centrifugazione e/o filtrazione, per quanto detto sinora è intuitivo il fatto che questo non potesse essere l'approccio migliore. Per tale motivo ad oggi si prediligono due strategie diverse, la prima prevede, in maniera analoga con quanto detto nel paragrafo precedente, di combinare il materiale grafatico con matrici polimeriche, in modo da rendere il materiale facilmente manipolabile. Tuttavia a causa delle interazioni con il materiale polimerico alcuni siti sulla superficie del nanomateriale a base di carbonio potrebbero essere occupati e non disponibili a stabilire legami con la specie inquinante, o ancora, a causa di ingombro sterico la velocità di adsorbimento può risultare rallentata. Una seconda strategia consiste, invece, nel funzionalizzare i nanotubi di carbonio o il grafene con delle piccole nanoparticelle magnetiche mediante legami stabili, in questo modo grazie al semplice utilizzo di un magnete è possibile in maniera rapida e semplice recuperare il materiale disperso nella fase acquosa. Anche in questo caso però è possibile avere una diminuzione del numero dei siti di legame per l'inquinante a causa dell'ingombro sterico esercitato dalle nanoparticelle magnetiche sulla superficie del nanomateriale. Le cinetiche di legame invece sono meno rallentate con questo tipo di approccio in quanto il materiale può mantenere il suo stato di polvere garantendo un più rapido accesso ai siti di legame sulla superficie del nanomateriale.

## Degradazione fotocatalitica di inquinanti

La riduzione/ossidazione fotocatalitica mediata da semiconduttori è sempre stata considerata una delle tecnologie più promettenti per la degradazione fotochimica di inquinanti. Negli anni diversi materiali semiconduttori utili per questi scopi come ad esempio  $TiO_2$ ,  $Fe_2O_3$ , ZnO etc. sono stati prodotti in varie forme e con vari metodi. Tuttavia la loro efficienza di degradazione del-

le sostanze organiche non è mai stata sufficiente. Per tale motivo si è reso necessario intraprendere nuove strategie al fine di migliorare le performance di tali materiali. In quest'ottica materiali ibridi costituiti da  $TiO_2$  e carbonio grafítico (nanotubi di carbonio e grafene) hanno attirato l'attenzione degli scienziati. I compositi preparati combinando questi materiali piuttosto che quelli costituiti dal solo semiconduttore hanno evidenziato una capacità di degradazione fotocatalitica maggiore, ciò è dovuto principalmente al fatto che il materiale grafítico ha una maggiore capacità di adsorbimento degli inquinanti i quali saranno vicini al semiconduttore che potrà quindi esplicare la sua azione catalitica in maniera efficiente. Ma questo non è l'unico vantaggio, infatti la presenza della superficie grafítica permette di inibire la ricombinazione della coppia elettrone-lacuna formata a seguito dell'irradiazione con una sorgente luminosa il che contribuisce ancora una volta a migliorare l'efficienza fotodegradativa del sistema. Un altro limite dei semiconduttori utilizzati per fotocatalisi è rappresentato dal fatto che questi funzionano mediante irradiazione con luce UV, richiedendo l'utilizzo di appositi impianti con un certo dispendio di energia. Anche in questo caso la combinazione di nanotubi di carbonio o grafene con materiali semiconduttori ( $TiO_2$ ) sembra essere un'importante strategia per risolvere il problema. È stato visto infatti come effettuando un drogaggio della superficie grafítica con atomi di azoto è possibile mediante opportuni passaggi di sintesi chimica depositare sulla superficie un rivestimento di  $TiO_2$  il quale aderirà senza l'utilizzo di ulteriori specie chimiche [8]. A seguito dell'adesione si avrà un'interazione molto stretta tra le due specie che porta all'introduzione di nuovi livelli energetici. Questo permette al sistema di funzionare mediante irradiazione con luce visibile, permettendo l'utilizzo *in situ* del sistema con minori consumi energetici. Sistemi di degradazione fotocatalitica di questo genere sono stati proposti ad esempio per la degradazione di oli, fenoli e diversi antibiotici.

## Conclusioni

Negli ultimi anni sono stati compiuti enormi progressi nella sintesi di nuovi materiali compositi e non a base di nanomateriali costituiti da carbonio

grafítico. Molte di queste tecnologie hanno evidenziato delle ottime capacità di adsorbimento e/o degradazione di inquinanti organici e inorganici in soluzioni acquose. Tuttavia, i test su questi materiali si sono spesso fermati nei laboratori dove sono state utilizzate soluzioni con composizioni distanti dalle matrici reali. La prossima sfida che la comunità scientifica si troverà ad affrontare, oltre che l'ulteriore sviluppo di questi materiali, sarà il loro impiego in contesti complessi e reali quali bacini contaminati e scarichi industriali. Solo a seguito di questi test tali prodotti potranno essere immessi sul mercato per essere commercializzati. Nella fase di test in matrici reali sarà anche importante valutare eventuali processi di degradazione del materiale che possano causare la dispersione di nanotubi o grafene nell'ambiente, al fine di evitare eventuali tossicità per l'ecosistema. Numerose rimangono quindi le sfide da affrontare, ma, le potenzialità che questi materiali a base grafítica hanno dimostrato, fanno ben sperare per un mondo più pulito e con maggiori risorse idriche per la popolazione.



- [1] S. Iijima: "Helical microtubules of graphitic carbon", *Nature*, **354** (1991) 56.
- [2] A. K. Geim, K. S. Novoselov: "The rise of graphene", *Nat. Mat.*, **6** (2007) 183.
- [3] R. K. Gupta, G. J. Dunderdale, M. W. England and A. Hozumi: "Oil/water separation techniques: a review of recent progresses and future directions", *J. Mater. Chem.*, **A 5** (2017) 16025.
- [4] E. Z. Ron, E. Rosenberg: "Biosurfactants and oil bioremediation", *Curr. Opin. Biotechnol.*, **13** (2002) 249.
- [5] A. Turco, C. Malitesta, G. Barillaro, A. Greco, A. Maffezzoli and E. Mazzotta: "A magnetic and highly reusable macroporous superhydrophobic/superoleophilic PDMS/MWNT nanocomposite for oil sorption from water", *J. Mater. Chem.*, **A 3** (2015) 17685.
- [6] A. Turco, A.G. Monteduro, E. Mazzotta, G. Maruccio, C. Malitesta: "An Innovative Porous Nanocomposite Material for the Removal of Phenolic Compounds from Aqueous Solutions", *Nanomaterials*, **8** (2018) 334.
- [7] Y. Wang, C. Pan, W. Chu, A.K. Vipin, L. Sun: "Environmental remediation applications of carbon nanotubes and graphene oxide: Adsorption and catalysis", *Nanomaterials*, **9** (2019) 439.
- [8] B. A. Bhanvase, T. P. Shende, and S. H. Sonawane: "A review on graphene-TiO<sub>2</sub> and doped graphene-TiO<sub>2</sub> nanocomposite photocatalyst for water and wastewater treatment", *Environ. Technol. Rev.*, **6** (2017) 1-14.

**Antonio Turco:** Antonio Turco è un ricercatore presso il Dipartimento di Scienze e Tecnologie Biologiche ed Ambientali, Università del Salento. La sua attività di ricerca è concentrata sullo sviluppo di materiali (nano)compositi da applicare nel campo della rimediazione ambientale, del trattamento di rifiuti e dell'ingegneria tissutale. Si occupa inoltre dello sviluppo di materiali nanostrutturati e/o polimeri a stampo molecolare di interesse per applicazioni sensoristiche. È stato coordinatore di due progetti scientifici (FutureInResearch-Ultrasensitive sensors for food analysis e FondazionePuglia-Bando Ricercatori 2015-Materiali innovativi porosi nanocompositi per la rimozione ed il recupero di composti fenolici da Acque di Vegetazione olearie) ed è coautore di 28 pubblicazioni su riviste scientifiche internazionali.