

NANOMATERIALI A BASE DI GRAFENE E POSSIBILI RISCHI PER LA SALUTE NEI SOGGETTI ESPOSTI

CHE COS'È IL GRAFENE

Il grafene è costituito da un singolo strato di atomi di carbonio disposti in una struttura esagonale a nido d'ape (Figura 1a). Le sue proprietà, tra cui elevata resistenza meccanica, ampia su-

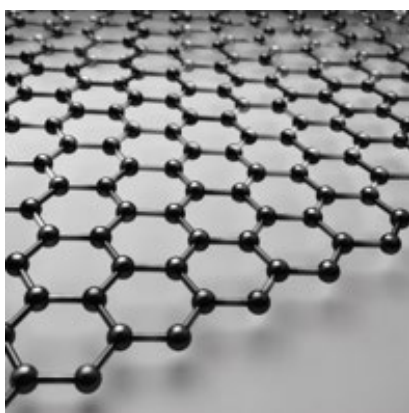
perficie specifica e conducibilità elettrica e termica, ne favoriscono l'impiego in numerosi settori industriali e tecnologici.

I nanomateriali a base di grafene (GBN) comprendono grafene monostrato, grafene a pochi strati, ossido di grafene, ossido di grafene ridotto, nanopiastrine, nanofogli, nanoscaglie (Figura 1b) e punti quantici.

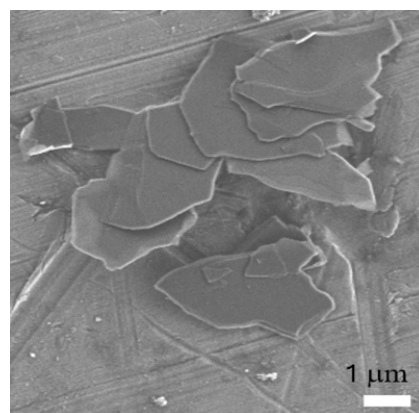
Figura 1

Grafene e GBN

a



b



a. Struttura del grafene; b. Nanoscaglie di grafene al SEM.

(a. Illustrazione realizzata con strumenti di IA generativa; b. Tratta da Freseigna AM & Ciervo A, Ursini CL et al. Preliminary Study to Investigate Possible Cyto-Genotoxic and Oxidative Effects of Few-Layer Graphene in Human Bronchial Cells. Int J Mol Sci. 2024;25(24):13515)

PRINCIPALI APPLICAZIONI

I GBN trovano applicazione in:

- elettronica ed energia (dispositivi elettronici flessibili, sensori, batterie, supercondensatori, celle solari);
- settori aerospaziale e automotive (in materiali compositi come rinforzo di polimeri, plastiche e vernici);
- settore biomedicale (biosensori, rilascio di farmaci, ingegneria tissutale, diagnostica per immagini, teranostica, superfici antibatteriche);
- imballaggi e industria alimentare (materiali barriera avanzati);
- ricerca e sviluppo (applicazioni sperimentali in ambito chimico, ambientale e dei materiali).

VIE DI ESPOSIZIONE

Nella popolazione generale l'esposizione ai GBN è generalmente bassa e legata a emissioni accidentali o al rilascio da prodotti di consumo. In ambito occupazionale la principale via di esposizione è l'inalazione di polveri durante le lavorazioni a secco; sono possibili anche contatto cutaneo e ingestione accidentale. L'esposizione indiretta può verificarsi durante operazioni di pulizia e manutenzione dei macchinari di produzione.

EFFETTI SULLA SALUTE

Gli effetti biologici dei GBN dipendono da caratteristiche fisico-chimiche, dimensioni, dose e durata dell'esposizione. Studi *in vitro* evidenziano citotossicità (ridotta vitalità cellulare, danni alla membrana, apoptosi, disfunzioni mitocondriali), genotossicità (danno diretto/ossidativo al DNA), stress ossidativo e risposte infiammatorie. Studi *in vivo* su animali indicano che alcuni GBN possono accumularsi nei polmoni causando stress ossidativo, infiammazione e, in specifiche condizioni, fibrosi; entità e persistenza degli effetti dipendono da dose, dimensione delle particelle, rigidità, biopersistenza e caratteristiche fisico-chimiche.

Uno studio del 2024 su 14 volontari sani ha mostrato che l'inalazione controllata per 2 ore di nanofogli di ossido di grafene non è associata, nel breve periodo, ad effetti respiratori, cardiovascolari o infiammatori acuti evidenti.

STUDI DI MONITORAGGIO DELL'ESPOSIZIONE E DEGLI EFFETTI

I dati disponibili sono ancora limitati e mancano studi epidemiologici longitudinali. Valutazioni effettuate in

aziende produttrici e laboratori di ricerca europei indicano un rischio espositivo generalmente basso in presenza di adeguate misure preventive, ma più elevato durante la manipolazione di polveri o cambiamenti di processi, materiali, personale. Un recente studio statunitense condotto in 11 stabilimenti su 44 lavoratori ha evidenziato livelli di esposizione maggiori nella produzione primaria (sintesi/manipolazione della polvere) rispetto a quella secondaria (trasformazione/incorporazione); i livelli dipendono dall'efficacia dei controlli tecnici e dall'uso dei DPI (dispositivi di protezione individuale). In particolare, le concentrazioni geometriche medie di carbonio elementare (EC) sono risultate pari a 2,01 µg/m³ per la frazione respirabile e 12,63 µg/m³ per quella inalabile; il valore orientativo di occupational exposure band, OEB, di < 10 µg/m³, proposto nell'ambito dell'occupational exposure banding dal Niosh (US National institute for occupational safety and health), è stato superato nel 38% dei campioni respirabili e nel 53% di quelli inalabili.

Nell'unico studio di biomonitoraggio disponibile, condotto dal settore ricerca Inail su 6 lavoratori esposti a GBN, è stato osservato un aumento di biomarcatori di effetto genotossico precoce (% di soggetti positivi al Micronucleo valutato con il buccal micronucleus assay)

e ossidativo al DNA (valutato con Fpg-comet assay), senza variazioni significative dei biomarcatori urinari di infiammazione e stress ossidativo. Lo studio suggerisce che l'esposizione a GBN possa determinare alterazioni biologiche precoci e ancora riparabili a livello cellulare in assenza o prima della comparsa di effetti infiammatori sistemici. Il monitoraggio ambientale ha evidenziato contaminazione da GBN nelle fasi di stoccaggio e pulizia. Nel successivo follow-up, l'adozione di misure preventive (sistemi chiusi, ventilazione locale e DPI) ha ridotto significativamente l'esposizione e gli effetti genotossico-ossidativi.

CONCLUSIONI

I GBN offrono importanti opportunità tecnologiche e industriali, ma richiedono particolare attenzione alla tutela della salute dei lavoratori potenzialmente esposti. I pochi studi *in vivo* disponibili (principalmente su animali) indicano possibili effetti soprattutto a carico dell'apparato respiratorio e suggeriscono l'adozione di un approccio precauzionale. In assenza di valori limite normativi specifici, è fondamentale ridurre l'esposizione mediante misure tecniche e organizzative e attuare una sorveglianza sanitaria mirata ad evidenziare possibili effetti precoci nei lavoratori esposti.

RIFERIMENTI NORMATIVI

Il grafene e i GBN rientrano nel quadro normativo europeo per le sostanze chimiche e le nanoforme.

Decreto interministeriale del 20/12/2021 (recepimento della direttiva UE 2019/1832)

Aggiornamento dell'Allegato VIII del d.lgs. 81/2008 in materia di DPI.

Regolamento (UE) 2018/1881

Aggiornamento del REACH con requisiti specifici per le nanoforme.

PER ULTERIORI INFORMAZIONI

Contatti: a.fresegha@inail.it; au.ciervo@inail.it; d.cavallo@inail.it

BIBLIOGRAFIA ESSENZIALE

Andrews JPM, Joshi SS, Tzolos E et al. First-in-human controlled inhalation of thin graphene oxide nanosheets to study acute cardiorespiratory responses. *Nat Nanotechnol.* 2024;19(5):705-14.

Dahm MM, McCormick S, Niang M et al. Evaluating occupational exposures to the graphene family of nanomaterials: Implications for worker safety and health. *J Occup Environ Hyg.* 2026:1-15.

PAROLE CHIAVE

Grafene, Nanomateriali, Effetti, Salute