

# Migliori pratiche per un lavoro sicuro sul grafene

L'uso di materiali a base di grafene è in aumento. Nuove tecnologie e nuovi materiali possono implicare problemi di sicurezza nell'ambiente di lavoro. L'esposizione dei lavoratori a processi nuovi o in fase di sviluppo dovrebbe essere valutata attentamente per ridurre i rischi per la salute.

## Grafene e materiali a base di grafene (GBM)

Il grafene, un materiale bidimensionale, è costituito da un monostrato di atomi di carbonio disposti in una struttura a nido d'ape, con un'elevata area superficiale su entrambi i lati dell'asse planare. Dal suo isolamento nel 2004 mediante esfoliazione meccanica della grafite, l'interesse per il grafene è aumentato nel corso degli anni grazie alle sue uniche proprietà fisico-chimiche.

Cento volte più resistente dell'acciaio, il grafene è tuttavia flessibile, elettricamente conduttivo e impermeabile a tutti i gas. L'ossidazione e/o la funzionalizzazione possono generare un'ampia famiglia di materiali a base di grafene (GBM), come l'ossido di grafene (GO), l'ossido di grafene ridotto (rGO), il grafene a pochi strati (FLG) e altri. Inoltre, la superficie planare del grafene può essere funzionalizzata con, ad esempio, gruppi carbonilici, idrossilici ed epossidici o agenti di copertura o rivestimenti (ad esempio, glicole polietilenico).

Pertanto, i GBM presentano una varietà di proprietà straordinarie che li rendono compatibili per una moltitudine di applicazioni, come dispositivi di accumulo di energia, celle solari, imballaggi alimentari avanzati, touch screen pieghevoli e rivestimenti protettivi per turbine eoliche e navi, nonché applicazioni biomediche, come sistemi di somministrazione di farmaci, ingegneria tissutale e imaging.

L'aumento del mercato e dell'uso dei GBM richiede una valutazione approfondita del loro possibile impatto sulla salute umana, poiché le proprietà fisico-chimiche possono anche facilitare la loro interazione con i sistemi biologici, influenzando la risposta tossica.

Il principale rischio rappresentato dai GBM per la salute umana sembra essere associato all'esposizione professionale in seguito ad inalazione durante la loro produzione e l'uso.

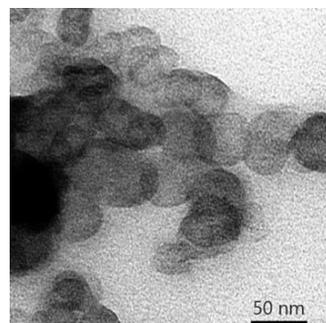
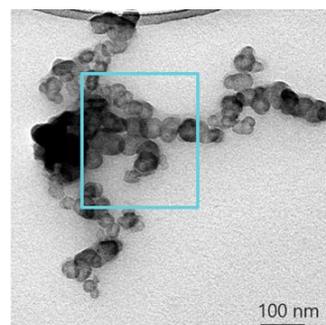


Immagine al microscopio elettronico a trasmissione dell'ossido di grafene (GO) in un campione d'aria raccolto dalla zona di respirazione di un lavoratore.

### CONTATTO

**Tomi Kanerva**  
Senior specialist  
tomi.kanerva@ttl.fi  
+358 30 474 8670

**Marco Pelin**  
Ricercatore RTD-b  
mpelin@units.it  
+39 040 558 8620

## Valutazione del rischio e dell'esposizione

### Valutazione del pericolo

Studi di tossicità *in vitro* mostrano che gli effetti tossici dei GBM dipendono dalle loro caratteristiche fisico-chimiche. Pertanto, il potenziale pericolo di ciascun GBM deve essere valutato singolarmente. Il principale meccanismo di tossicità del grafene è la generazione di specie reattive dell'ossigeno che possono causare danni cellulari e al DNA. Le particelle fini di grafene si disperdono facilmente nell'aria e rappresentano un potenziale pericolo di inalazione. Gli studi di tossicità per inalazione mostrano infiammazione polmonare, fibrosi e biopersistenza nei roditori. Le particelle di grafene possono poi traslocare dai polmoni ad altri organi, come i linfonodi e il fegato, ma gli effetti sulla salute sono ancora oggetto di studio.

### Esposizione professionale

Nel caso dei nanomateriali, compreso il grafene, l'inalazione è considerata la via di esposizione più importante. L'esposizione della pelle è anche possibile in molte attività lavorative. Tuttavia, la pelle non danneggiata è una protezione efficace contro le esposizioni esterne.

I rischi per la salute posti dall'esposizione professionale a lungo termine al grafene non sono ancora noti, pertanto si consiglia di seguire il principio di precauzione ed evitare l'esposizione quando possibile.



Un fusto contenente polvere di grafene viene svuotato e pulito in una cappa aspirante. Il lavoratore utilizza una protezione del filtro (TH3P) con un ventilatore e un cappuccio, indumenti protettivi di tipo 5 e guanti in nitrile.

### Valutazione dell'esposizione

La valutazione dell'esposizione inalatoria dovrebbe essere effettuata secondo l'approccio standard dell'OCSE e del CEN (OCSE 2015, CEN 2018). L'approccio multimetrico armonizzato per la misurazione dell'esposizione sul posto di lavoro considera tre livelli di valutazione.

#### Livello 1 - Valutazione iniziale

- Le informazioni rilevanti sul posto di lavoro, sui processi e sulle attività di produzione sono raccolte strutturalmente secondo le migliori pratiche in materia di igiene del lavoro.
- Insieme a informazioni dettagliate sui materiali, è possibile considerare il potenziale rilascio ed emissione di nanomateriali (compresi i materiali bidimensionali) nell'aria del luogo di lavoro.
- Gli strumenti di controllo e/o di fasce di rischio possono essere utilizzati per esaminare la potenziale esposizione.

#### Livello 2 – Valutazione dell'esposizione

- L'esposizione ai nanomateriali viene studiata utilizzando apparecchiature adeguate per rilevare i livelli presenti nell'aria in tempo reale durante i processi di lavoro.
- Il campionamento *off-line* e l'analisi dell'aria sul posto di lavoro per caratterizzare i possibili nanomateriali (ad esempio, utilizzando la microscopia elettronica) sono combinati con la valutazione in tempo reale.

#### Livello 3 - Valutazione dell'esposizione del personale

- L'esposizione alle particelle sospese nell'aria nella zona di respirazione del lavoratore è caratterizzata in modo completo utilizzando tecniche all'avanguardia e confrontata con i corrispondenti valori di riferimento attualmente disponibili.



Nella valutazione del rischio e dell'esposizione, è essenziale la discriminazione delle particelle di grafene dalle particelle di fondo.

## Prevenzione dell'esposizione professionale

### Valori limite, raccomandazioni

Attualmente non esistono valori limite di esposizione professionale (OEL) per il grafene o qualsiasi altro nanomateriale. Per le nanoparticelle generate industrialmente, l'Istituto finlandese per la salute sul lavoro (FIOH) ha definito livelli target per un tempo di esposizione di 8 ore:

- 20000 particelle/cm<sup>3</sup> (densità > 6000 kg/m<sup>3</sup>)
- 40000 particelle/cm<sup>3</sup> (densità < 6000 kg/m<sup>3</sup>)

I livelli proposti dal FIOH per le concentrazioni di polveri sul posto di lavoro (8 ore), che possono essere applicati se non esiste un valore di OEL specifico per la polvere in questione, sono:

- 0,5 mg/m<sup>3</sup> (polveri generiche, frazione respirabile)
- 2 mg/m<sup>3</sup> (polvere generale, frazione inalabile)

### Ambiente di lavoro e valutazione dei rischi

Nell'ambiente di lavoro, l'esposizione al grafene e/o ad altri nanomateriali bidimensionali è correlata alla sicurezza e al controllo delle emissioni dei processi di sintesi (ad esempio esfoliazione della grafite, CVD) e nelle fasi di produzione del prodotto. Inoltre, nelle fasi di fine vita, come il riciclaggio e la gestione dei rifiuti, l'esposizione professionale può essere significativa.

Attualmente, nelle fasi di produzione e manipolazione, i GBM sono spesso in uno stato di liquido/pasta, minimizzando le emissioni e il potenziale di esposizione.

Le fasi finali del processo di sintesi/produzione, quando il grafene/nanomateriale bidimensionale prodotto viene essiccato e confezionato per un ulteriore utilizzo, sono i punti più critici per l'esposizione dei lavoratori, oltre alle attività di manutenzione e pulizia delle apparecchiature di processo, dove il materiale secco può essere rilasciato in modo incontrollato o accidentale.

### Prevenzione dell'esposizione

Similmente a qualsiasi agente chimico nocivo, per ridurre al minimo l'esposizione del lavoratore al grafene, è richiesto l'utilizzo dei principi di igiene sul lavoro. Secondo la gerarchia dei controlli, nota come principio STOP, le misure di controllo dovrebbero essere attuate nel seguente ordine:



**Sostituzione:** utilizzare materiale meno pericoloso, evitare materiali secchi, utilizzare alimentatori di dosaggio e confezioni monouso.

**Misure tecniche:** sistema chiuso, pressione negativa dell'aria, cappe aspiranti, ventilazione di scarico locale, automazione di processo, filtrazione in ventilazione.

**Misure organizzative:** ridurre al minimo l'esposizione (tempo e numero di lavoratori), formazione per le migliori pratiche, pulizia a umido o certificata sottovuoto per le polveri sottili, limitare l'accesso all'area di rischio.

**Protezione personale:** protezione delle vie respiratorie (classe P3), indumenti protettivi, guanti, occhiali di sicurezza.



Quando il grafene viene maneggiato allo stato liquido o in pasta, si raccomanda la maschera protettiva respiratoria FFP3, gli indumenti protettivi e i guanti in nitrile.

## Lista di controllo e informazioni complementari



### Lista di controllo per il datore di lavoro:

- La valutazione dei rischi è stata condotta sul posto di lavoro?
- Sono stati identificati processi di lavoro che comportano un rischio di esposizione?
- Gli aspetti di sicurezza sono stati presi in considerazione nel piano di produzione?
- Sono disponibili schede di sicurezza per i materiali e le sostanze chimiche?
- Tutti i lavoratori sono stati sufficientemente formati per seguire le misure di sicurezza richieste?
- Il grafene è usato in polvere?
- E' stato confermato che le misure tecniche sono efficienti e funzionano correttamente?
- La ventilazione generale è sufficiente?
- Tutti i dispositivi di protezione individuale necessari sono facilmente disponibili?
- Esistono istruzioni per l'uso e la manutenzione dei dispositivi di protezione e vengono seguite queste istruzioni?
- Esistono istruzioni per procedure di pulizia sicure?



### Lista di controllo per il lavoratore:

- Hai letto la scheda tecnica di sicurezza dei materiali e prodotti chimici?
- Le sostanze chimiche, compresi i nanomateriali, sono conservate e manipolate in modo appropriato?
- Sei stato formato sulle misure di sicurezza richieste?
- Le istruzioni di sicurezza vengono seguite in tutte le fasi del lavoro?
- Utilizzi i dispositivi di protezione individuale indicati quando richiesto?
- Hai letto le istruzioni per l'uso e la manutenzione dei dispositivi di protezione e segui queste istruzioni?
- Il posto di lavoro è pulito e ordinato?
- Sai come operare in situazioni impreviste o di emergenza?



### Informazioni complementari

Rimani aggiornato con le ultime  
informazioni scientifiche e  
linee guida normative!

- Graphene Flagship <https://graphene-flagship.eu/>
- Graphazard project <https://projects.safera.eu/project/26>
- Hazard characterization of graphene based nanomaterials in energy production and storage <https://www.ttl.fi/en/research/projects/hazard-characterization-graphene-based-nanomaterials-energy-production-and-storagegraphazard-safeura>
- EUON (European Union Observatory for Nanomaterials) study report of the potential health and environmental effects of GBMs:  
[https://euon.echa.europa.eu/documents/2435000/3268573/echa\\_2021\\_286\\_graphene\\_study.pdf](https://euon.echa.europa.eu/documents/2435000/3268573/echa_2021_286_graphene_study.pdf)
- The European Chemicals Agency (ECHA) registration dossier of graphene <https://echa.europa.eu/it/registration-dossier/-/registered-dossier/24678>