

ESPOSIZIONE AI GAS DI SCARICO DEI MOTORI DIESEL: VALORE LIMITE DI ESPOSIZIONE PROFESSIONALE E STRATEGIE NELLA VALUTAZIONE DELL'ESPOSIZIONE

PREMESSA

I motori diesel sono noti per la loro efficienza ed affidabilità. Tutt'oggi vengono utilizzati in vari settori: trasporti, edilizia, agricoltura, marittimo, manifatturiero e minerario. Nel 2012 la IARC (International Agency on Research on Cancer) ha classificato i gas di scarico dei motori diesel (Diesel Engine Exhaust, DEE) come cancerogeni di gruppo 1 (sostanze per le quali esistono sufficienti evidenze di cancro per l'uomo), mentre la "Roadmap on Carcinogens" (Programma d'azione volontario promosso dalla Commissione Europea, dai Ministeri di diversi Stati membri e da Agenzie Europee come l'Agenzia per le sostanze chimiche), al fine di prevenire l'esposizione agli agenti cancerogeni nei luoghi di lavoro in tutta Europa, ha mostrato l'entità dell'esposizione occupazionale ai DEE, con più di 3.6 milioni di lavoratori esposti e un aumentato rischio del 40% di sviluppare cancro ai polmoni. Il Decreto interministeriale dell'11 febbraio 2021 (D.I. 11 febbraio 2021), che recepisce la Direttiva (UE) 2019/130 tratta del rischio di esposizione alle emissioni dei motori diesel. Questo decreto modifica l'Allegato XLII (elenco di sostanze, miscele e processi) del d.lgs. 81/2008, inserendo le "emissioni dei gas di scarico dei motori diesel" tra i processi che comportano l'esposizione a cancerogeni. Inoltre, modifica l'Allegato XLIII (valori limite) con l'introduzione di un valore limite di esposizione professionale inalatoria (VLEP) per i DEE pari a 0.05 mg/m³, espresso come concentrazione aerodispersa di carbonio elementare nelle 8 ore di lavoro. Tale valore è operativo dal 21 febbraio 2023, ad eccezione dei lavori in sotterraneo, per i quali lo sarà nel 2026.

VLEP PER ESPOSIZIONE A DEE: CARBONIO ELEMENTARE

L'attuale VLEP normativo ha come riferimento il parere ufficiale dello SCOEL (Scientific Committee on Occupational Exposure Limits) e della IARC. Lo SCOEL 2017 sostiene che "non è possibile stabilire una soglia critica che possa servire per la derivazione di un OEL (occupational exposure limit)". La IARC, invece, riporta che non è possibile stabilire un valore limite "health-based" per i DEE, ma suggerisce di utilizzare il carbonio elementare, un tracciante della miscela della emissione diesel, come indicatore di esposizione (art. 16 della Direttiva 130/2019). Il valore limite di 0.05 mg/m³ in carbonio elementare fissato dal D.I. 11 febbraio 2021 è dunque un limite "operativo" e non sanitario, come operativa è la stessa definizione di carbonio elementare. Nella IARC Press release 312 del 12 Giugno 2012 sono considerati studi epidemiologici e tossicologici per concludere che la sola fase particellare delle emissioni diesel, di cui il

carbonio elementare è tracciante quando la fonte è vicina al soggetto, comporta un aumento dell'incidenza di tumori polmonari. Il VLEP del carbonio elementare rappresenta un compromesso tra un valore per tutelare la salute dei lavoratori ed un valore quantificabile con le metodiche analitiche attualmente a disposizione. La tossicità della miscela dei DEE è ascrivibile prevalentemente alla presenza di prodotti incombusti, come gli idrocarburi policiclici aromatici (IPA) e sostanze a più alto peso molecolare, classificati come cancerogeni accertati per l'uomo (di gruppo 1 secondo la IARC, quali ad esempio il benzo(a)pirene) o come cancerogeni probabili (gruppo 2A) e possibili (gruppo 2B).

Una domanda che possiamo porci è la seguente: quanto siamo precauzionali nel proteggere i lavoratori dall'esposizione ai DEE con un VLEP espresso in carbonio elementare? Il report di Vermeulen del 2022 mostra come in una casistica di 229 milioni lavoratori europei l'aumentato rischio di cancro al polmone cambi variando i valori di VLEP. Per un valore VLEP di 0.05 mg/m³, infatti, si ottiene un aumento del rischio pari a 268 lavoratori su 10000, mentre per un VLEP di 0.01 mg/m³ l'aumentato rischio si traduce in 166 lavoratori su 10000, un valore che scende ulteriormente a 26 nel caso di 0.001 mg/m³. Recentemente i Paesi Bassi hanno fissato un limite di esposizione di 0.001 mg/m³ del carbonio elementare per l'esposizione occupazionale ai DEE.

Possiamo quindi ipotizzare che nei prossimi anni, anche in Italia, il VLEP del carbonio elementare potrà essere ulteriormente ridotto.

La valutazione dell'esposizione inalatoria ai DEE nei luoghi di lavoro attraverso il confronto con il VLEP pari a 0.05 mg/m³, espresso in termini di carbonio elementare, stabilito dalla normativa, è un percorso complesso e richiede di prendere in considerazione diversi aspetti, che verranno analizzati in questa fact-sheet.

CAMPIONAMENTO ED ANALISI DEL CARBONIO ELEMENTARE

I DEE sono miscele complesse di centinaia di composti chimici, emessi in parte in fase gassosa ed in parte come particelle (Particulate Matter, PM). Il PM può causare tumori polmonari e sarcomi, quindi l'attenzione va posta sulla quantificazione della fase particolata. Le particelle del PM possono avere un diametro che oscilla da valori inferiori al nanometro fino a 10 micrometri (variabilità della distribuzione dimensionale del PM).

Nonostante lo SCOEL nel 2017 abbia tenuto conto della variabilità della distribuzione dimensionale del PM, la IARC sottolinea la necessità di non fare alcuna distinzione basata sulle dimensioni delle particelle nella valutazione dell'esposizione. Anche nel D.I. 11 febbraio 2021, non si fa riferimento ad una frazione granulometrica target per i DEE.

La misurazione del carbonio elementare prevede una fase di campionamento di PM su filtro e una successiva analisi termo-ottica per la sua quantificazione, attraverso 4 diversi protocolli analitici (NIOSH 5040, NIOSH-like, EUSAAR2 e IMPROVE). Per la fase di campionamento in alcuni casi è previsto il campionamento del PM totale (filtro a faccia aperta), in altri il campionamento selettivo di PM_{2.5} o PM₁ facendo riferimento alle norme tecniche (UNI EN 481:1994, citata dal d.lgs. 81/2008 e s.m.i. e UNI EN 14530/2005, UNI EN 16909/2017 citate dal documento dell'Associazione Italiana Igienisti Industriali (AIDII) 2023). Questi aspetti non sono menzionati nel D.I. 11 febbraio 2021, e non si tiene neppure conto del fatto che per ottenere limiti di quantificazione per il carbonio elementare (LOQ) sufficientemente bassi (inferiori al valore 0.002 mg/m³ indicato nel metodo NIOSH 5040, che tratta della quantificazione del "diesel particulate matter" in termini di carbonio elementare) è necessario campionare più di 1 m³ di aria, con tempi di analisi lunghi. Per quanto riguarda la fase analitica, l'analisi termo-ottica prevede un processo preliminare di quantificazione multi-step delle componenti a base organica della miscela diverse dal carbonio elementare, fino al residuo in carbonio elementare. Durante l'analisi termica, lo strumento misura la trasmittanza laser a 660 nm attraverso il filtro per discriminare tra carbonio organico e carbonio elementare. Il carbonio elementare è quindi quantificato come differenza tra carbonio totale e carbonio organico. I protocolli analitici sopra indicati, si differenziano per le temperature massime raggiunte durante la prima fase analitica: IMPROVE (USA) e EUSAAR-2 (Europa) lavorano a temperature rispettivamente 550 °C e 650 °C, mentre NIOSH-like e NIOSH5040 lavorano a temperature più alte (870 °C e 850 °C). I protocolli a bassa e media temperatura determinano concentrazioni di carbonio elementare più elevate rispetto a quelli ad alte temperature, e ciò si traduce in una maggiore sensibilità del metodo, fattore molto importante in considerazione del fatto che, con le nuove tecnologie diesel, la percentuale di carbonio organico aumenta e quella di carbonio elementare diminuisce.

IDENTIFICAZIONE DEI LAVORATORI PROFESSIONALMENTE ESPOSTI A DEE

In presenza di un inquinante ubiquitario, per identificare i lavoratori professionalmente esposti si ricorre al confronto dei livelli di esposizione misurati nell'ambiente di lavoro con i livelli di esposizione della popolazione generale. Sebbene il carbonio elementare sia un contaminante ubiquitario, in quanto prodotto da processi di combustione, non esistono valori guida per la tutela della salute pubblica, come avviene invece per altri inquinanti (Direttiva europea sulla qualità dell'Aria del 24 aprile 2024). Il confronto con i valori guida per l'esposizione della popolazione generale, riferiti in genere alle 24 ore ed espressi come medie annuali, d'altronde, non è coerente con gli intervalli temporali di una esposizione lavorativa (8 ore). Un approccio corretto per discriminare la sorgente occupazionale di esposizione ai DEE è l'adozione di una strategia del confronto tra i livelli di concentrazione di esposizione misurati nell'ambiente

di lavoro e i livelli di concentrazione aerodispersa misurati all'esterno nel medesimo intervallo temporale. Questo approccio consente di quantificare l'apporto ambientale ai DEE in quella determinata zona. Una volta verificata la sorgente lavorativa e dunque l'esposizione professionale, andranno adottate tutte le misure di prevenzione e protezione previste per l'esposizione a cancerogeni ai sensi del Titolo IX, Capo II del d.lgs. 81/2008 e s.m.i., quali la misurazione periodica dell'esposizione, la sorveglianza sanitaria e l'iscrizione nel registro degli esposti. Tali misure andranno adottate a prescindere dai livelli di concentrazione di esposizione ai DEE e questa dovrà essere ridotta al livello tecnicamente più basso possibile (esposizione residuale). Le concentrazioni di esposizione residuale dovranno, in ogni caso, essere inferiori al VLEP, pena l'interruzione dell'attività lavorativa al fine di mettere in atto tutte le azioni necessarie.

IL CARBONIO ELEMENTARE È UN TRACCIANTE ESCLUSIVO DEL DEE? BLACK CARBON vs CARBONIO ELEMENTARE

Il metodo di analisi termo-ottico prevede diversi step e ciò determina un'incertezza di misura per il carbonio elementare. Inoltre, come riporta il documento NIOSH METHOD 5040, spesso il termine carbonio elementare è usato erroneamente come sinonimo di black carbon o fuliggine.

Nel 2011, il Global Atmospheric Watch-Scientific Advisory Group (GAW/WMO), nel tentativo di fare un po' di chiarezza ha suggerito alcune definizioni che possono essere così riassunte:

- il carbonio elementare è carbonio misurato con una tecnica analitica termo-ottica.
- Il black carbon è carbonio misurato con una tecnica analitica ottica.

Non esiste quindi una differenza chimica tra il carbonio elementare e il black carbon; tuttavia, essi hanno proprietà ottiche e fisiche differenti, evidenziate tramite quantificazione con le due tecniche analitiche sopra citate. In aggiunta, il black carbon è un inquinante primario proveniente dai DEE, la cui riduzione può avere benefici sul clima e sull'inquinamento atmosferico.

La risoluzione legislativa del 24 aprile 2024 adottata dal Parlamento Europeo, volta a migliorare la qualità dell'aria, suggerisce il monitoraggio continuo delle concentrazioni ambientali di carbonio elementare, black carbon e carbonio organico. I dati ottenuti dai monitoraggi nelle centraline ambientali per la qualità dell'aria, se resi confrontabili in termini di intervalli temporali con le misurazioni di esposizione, rappresenteranno un utile riferimento anche per discriminare le sorgenti occupazionali.

Effetti sulla salute del black carbon e quantificazione analitica

Il black carbon ha effetti avversi sulla salute. Nel 2012, l'Organizzazione Mondiale della Sanità (OMS) ha evidenziato:

- a) una forte correlazione tra le concentrazioni di black carbon e carbonio elementare;
- b) la possibilità del black carbon di essere carrier per altri composti tossici o cancerogeni.

Dopo il 2012, nuove pubblicazioni scientifiche hanno evidenziato che:

- a) il black carbon non è solo un "carrier";
- b) il black carbon ha effetti negativi sulla ricorrenza di eventi cardiovascolari e morti premature.

Questi dati confermano ulteriormente la necessità di quantificare il black carbon, come riportato anche nell'aggiornamento delle linee guida dell'OMS sulla qualità dell'aria (2021). La quantificazione del black carbon e del carbonio elementare, infatti, è stata inserita tra le buone pratiche necessarie per monitorare gli effetti sulla salute e sull'ambiente di questi inquinanti. La determinazione del black carbon può essere effettuata con uno strumento multispettro, che misura costantemente la trasmittanza della luce a dieci diverse lunghezze d'onda (da "near UV" a "near IR"). Esso calcola, in tempo reale, la concentrazione del black carbon attraverso l'utilizzo di un filtro su cui si accumula il particolato e consente la misurazione alternativa di PM10, PM2.5 o PM1, essendo dotato di teste di campionamento diverse.

VALORI MEDI DI CONCENTRAZIONE AERODISPERSA DEL CARBONIO ELEMENTARE NEI DIVERSI LUOGHI DI LAVORO

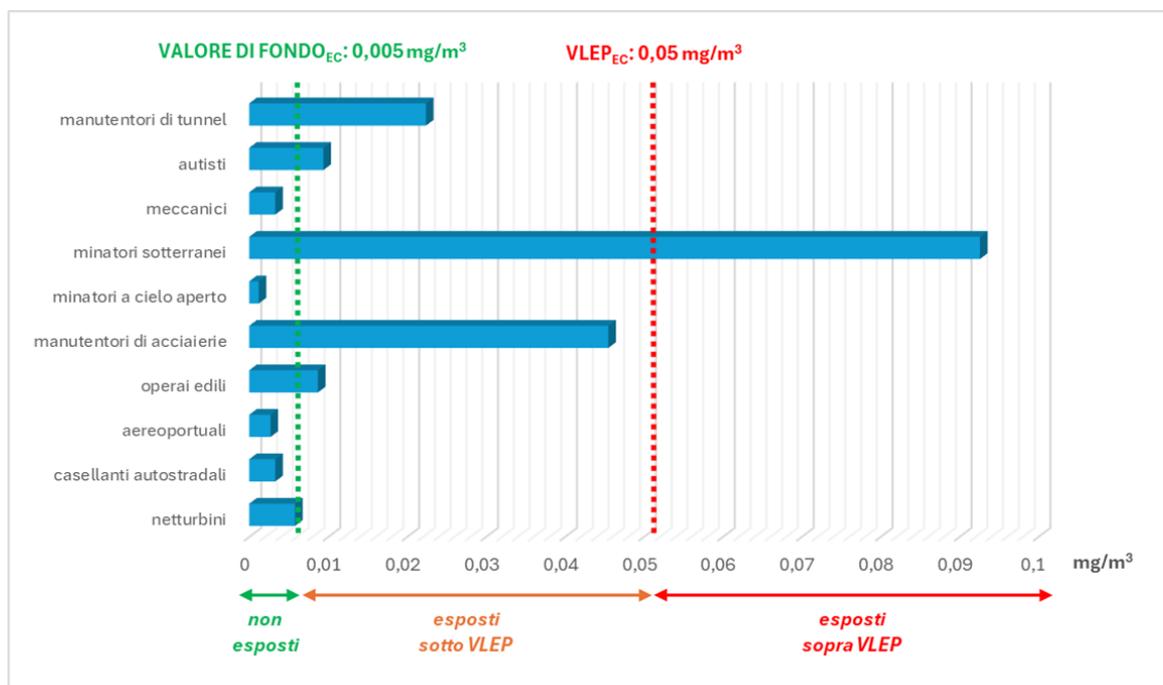
Nella letteratura scientifica il carbonio elementare è frequentemente utilizzato come marcatore per quantificare l'esposizione occupazionale ai DEE. Un lavoro recente, riportante misurazioni effettuate in 72 diversi luoghi di lavoro dal 1950 al 2005, evidenzia che nel

corso degli anni le esposizioni professionali al carbonio elementare sono diminuite, risultando al di sotto del VLEP di 0.05 mg/m³ fissato dal D.l. 11 febbraio 2021. Tuttavia, questo studio è stato condotto in Svezia, dove i livelli di inquinamento atmosferico, e quindi i valori di fondo per il confronto con i valori di esposizione della popolazione generale, sono diversi da quelli italiani.

In Italia, sono disponibili solo alcuni dati del carbonio elementare riferiti alla popolazione generale, con valori variabili anche su base stagionale. In particolare, la concentrazione ambientale del carbonio elementare varia tra 1x10⁻⁵ mg/m³ e 0.005 mg/m³, un valore massimo che è circa 10 volte inferiore al corrispondente VLEP. Assumendo tale valore massimo come valore di "fondo" e confrontandolo con le concentrazioni di carbonio elementare misurate in diversi luoghi di lavoro europei ed extraeuropei, è stato costruito un grafico che confronta i valori di concentrazione di carbonio elementare con il VLEP (Figura 1). Sulla base di tale confronto, i meccanici, i minatori a cielo aperto, i casellanti autostradali, gli aereoportuali, risulterebbero "lavoratori non esposti" (esposizione a valori del carbonio elementare uguali o inferiori a quelli della popolazione generale). I lavoratori che possono essere considerati "esposti", invece, presentano livelli di esposizione sia inferiori al VLEP di 0.05 mg/m³ (ad es. operai edili, autisti, manutentori di acciaierie o di tunnel) sia superiori al VLEP (ad es. minatori sotterranei). Per questi ultimi è obbligatoria un'attività di rientro al di sotto del VLEP.

Tale schema, seppure non esaustivo, può essere esemplificativo di un approccio corretto per l'identificazione

Figura 1 Concentrazione media di carbonio elementare per lavoratori esposti ai DEE. I valori di carbonio elementare sono confrontati con il valore di riferimento dedotto per la popolazione generale italiana (linea verde) e con il VLEP del D.l. 11 Feb. 2021 (linea rossa)



(Dati estrapolati da Pronk A, Coble J, Stewart PA. Occupational exposure to diesel engine exhaust: A literature review. Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology. Jul-Aug 2009; dove EC = carbonio elementare)

dei lavoratori esposti ai fini della sorveglianza sanitaria e la creazione del registro degli esposti per esposizione ai DEE. Nel D.I. 11 febbraio 2021 è stato fissato un VLEP per il carbonio elementare a distanza di circa dieci anni dalla pubblicazione della Monografia IARC del 2013 (vol. 105), dove i DEE sono stati classificati per la prima volta come cancerogeni. Tuttavia, come riportato dalla risoluzione legislativa del 24 aprile 2024 adottata dal Parlamento Europeo, volta a migliorare la qualità dell'aria, in aggiunta al carbonio elementare, anche il black carbon ed eventualmente il carbonio organico possono essere utilizzati per ottenere maggiori informazioni sulle sorgenti ambientali di DEE, per meglio discriminare quelle occupazionali.

CONCLUSIONI

La Direttiva Europea sulla qualità dell'aria non fissa un

valore guida per il carbonio elementare, ma stabilisce la necessità di monitorarlo a livello ambientale.

La disponibilità di dati di monitoraggio in continuo di questo inquinante, dunque, potrà contribuire alla conoscenza dei valori delle emissioni dalle sorgenti ubiquitarie, utili per discriminare con maggiore accuratezza le fonti di esposizioni occupazionali.

In aggiunta al carbonio elementare, il black carbon ed eventualmente il carbonio organico possono fornire maggiori informazioni sull'esposizione ai DEE.

A seguito del D.I. 11 febbraio 2021, da febbraio 2023 è entrato in vigore per i lavoratori un valore limite di esposizione occupazionale ai DEE misurato come carbonio elementare pari a 0.05 mg/m³, che rappresenta sicuramente un passo importante nella direzione di una corretta gestione dell'esposizione lavorativa residuale.

RIFERIMENTI NORMATIVI

Decreto interministeriale 11 febbraio 2021

Protezione dei lavoratori contro i rischi derivanti da un'esposizione ad agenti cancerogeni o mutageni durante il lavoro. (Gazzetta ufficiale Serie Generale n. 44 del 22 febbraio 2021).

PER ULTERIORI INFORMAZIONI

Contatti: g.folesani@inail.it

BIBLIOGRAFIA ESSENZIALE

Folesani G, Gherardi M, Galetti M, Petronini PG, De Pasquale F, Cavallo D, Corradi M.

Critical issues in assessing occupational exposure to diesel dust exhaust. *Med Lav* 2024; 115(4): e2024029. Doi: 10.23749/mdl.v115i4.16100.

Plato N, Lewné M, Gustavsson P. A historical job-exposure matrix for occupational exposure to diesel exhaust using elemental carbon as an indicator of exposure. *Arch Environ Occup Health*. 2020;75(6):321-332. Doi:10.1080/19338244.2019.1644277.

Vermeulen R, Portengen L. How serious are we about protecting workers health? The case of diesel engine exhaust. *Occup Environ Med*. Aug 2022;79(8):540-542. Doi:10.1136/oemed-2021-107752.

PAROLE CHIAVE

Gas di scarico dei motori diesel, Particolato (PM), Carbonio elementare, Black carbon, Carbonio organico