

Inquinanti dei motori diesel nella costruzione di gallerie

Bollettino 5: Particelle invisibili nell'aria ambiente – Pericoli per l'organismo

1. I polmoni – porta aperta agli inquinanti atmosferici

Sul lavoro, le sostanze nocive sono assorbite attraverso i polmoni. Il rischio di contatto può essere descritto così: durante il lavoro normale, ogni minuto 20 l d'aria e 10 l di sangue entrano in contatto su una superficie di scambio di circa 100 m². L'aria e il sangue sono separati unicamente da due strati di cellule spessi pochi millesimi di millimetro. Gli scambi gassosi e quindi l'assorbimento di sostanze nocive avvengono grazie a 500 milioni di alveoli (diametro circa 1/10 di millimetro), irrorati da una rete di capillari lunga all'incirca 2000 km. La sezione globale delle vie respiratorie, partendo dalla faringe, si allarga a quasi 1 m² e si ramifica fino ai bronchioli, il cui diametro può raggiungere circa 8 µm all'inspirazione e 3 µm all'espirazione. La velocità dell'aria si riduce in modo estremo, il tempo di perma-

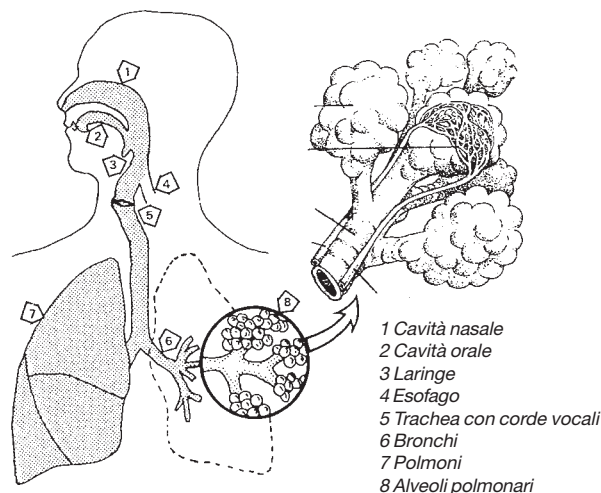


Figura 1: I polmoni, porta aperta agli inquinanti atmosferici
Fonte: Birgersson, *Chemie und Gesundheit* 1988 [1]

nenza si allunga in conformità: le sostanze nocive particellari hanno così sufficienti possibilità di depositarsi (sedimentazione, diffusione) o addirittura di penetrare più a fondo nell'organismo attraversando le sottili membrane cellulari.

Nel corso dell'evoluzione, il sistema delle vie respiratorie e il tessuto polmonare hanno tuttavia sviluppato meccanismi di difesa molto efficienti: la polvere viene fatta precipitare sulle superfici umide, le sottili ciglia vibratili evacuano costantemente lo strato di muco in direzione della faringe, e un raffinato sistema d'allarme con sensori chimici sensibili scatena p.es. tosse e starnuti affinché i polmoni rimangano ampiamente puliti. Inoltre gli alveoli e le vie respiratorie dispongono di fagociti migranti (macrofagi) in grado di assorbire ed evacuare le particelle e i microorganismi, o di disintegrarli, se si tratta di materiale organico.

Tutto funziona in modo assai perfetto per le sostanze estranee naturali a cui il nostro organismo si è adattato. Di dimensioni fino 2.5 µm (1 µm = 1 millesimo di mm), queste polveri hanno la granulometria delle più fini particelle di polvere trasportata dal Sahara che raggiunge le nostre latitudini. In presenza di sostanze nocive particellari, di dimensioni inferiori a 1 µm o solo di pochi nanometri (1 nanometro = 1 milionesimo di mm), i meccanismi di prote-

Editoriale

L'igiene dell'aria si concentra sulla questione dei rischi per la salute dovuti alle polveri fini respirabili. Per la medicina del lavoro, il tema non è nuovo. Ma solo negli ultimi anni si è visto che l'entità dei rischi è inversamente proporzionale alle dimensioni delle particelle – la cui superficie, composizione e altre caratteristiche hanno un ruolo decisivo – e che il loro effetto tossico non dipende solo dalla massa globale, ma in gran parte anche dal numero di particelle. Nell'ambito del progetto, VERT ha attribuito un'attenzione crescente a tale questione, adattando alla stessa i criteri di prova, le decisioni sui sistemi e l'analitica. Ciò ha permesso di concludere che solo filtri antiparticelle altamente efficienti nel flusso degli scarichi costituivano una soluzione alle emissioni di particolato diesel invisibile, giudicate particolarmente critiche nei più recenti studi tossicologici. Il presente bollettino cerca di dare una visione prospettica del problema.

AUVA, Suva, TBG

zione e di difesa sono però meno efficaci di quando combattono le particelle più grandi. Le combustioni tecniche producono in effetti particelle 10 volte più piccole delle polveri naturali. Anche le ramificazioni più sottili dei canali polmonari sono ancora grandi nei loro confronti; le microparticelle di polvere penetrano facilmente negli alveoli, sprovvisti di epitelio cigliato e quindi di meccanismo di rigetto efficace. Il tempo di permanenza all'interno dei polmoni è molto lungo. Possono trascorrere mesi prima che esse siano disintegrate o eliminate dal lavoro di pulizia dei macrofagi – che del resto sembrano non riconoscere le microparticelle – e finiscano nel sangue e nella linfa attraverso le pareti delle cellule o siano depositate definitivamente nel tessuto polmonare. Le polveri fini presentano inoltre superfici grandi e frastagliate per l'accumulo di altre sostanze tossiche, che sono così trasportate nella profondità dei polmoni dove possono divenire attive. I differenti parametri con un influsso nocivo sull'organismo – tempo di permanenza, solubilità, granulometria, superficie, proprietà chimiche e quantità di particelle – rappresentano un carico globale di cui l'organismo non è sempre all'altezza.

2. Qual è la granulometria del particolato finissimo?

Granello di sabbia grossolano	1 mm
Alveoli	0.1 mm
Capello (più sottile)	0.01 mm
Bronchioli	0.006 mm
Zellula (più piccola)	0.001 mm
Luce (limite inferiore di visibilità)	0.0004 mm
Particolato diesel (medio)	0.0001 mm
Virus	0.00001 mm
Molecola di gas (grande)	0.000001 mm

Il particolato diesel è quindi molto piccolo rispetto agli alveoli e sempre ancora piccolo rispetto alle cellule epiteliali dei polmoni. Si parla perciò anche di particelle ultrafini o nanoparticelle. Essendo in particolare più piccole della lunghezza d'onda della luce visibile, esse sono dunque invisibili.

Le dimensioni infime delle particelle e quindi la loro massa globale assai ridotta sembrano essere un vantaggio per valutare la concentrazione di questa sostanza nociva nell'aria respirata o scoprire un fenomeno di sovraccarico. Dal punto di vista biologico però il problema è proprio qui. In effetti queste particelle sono così fini che possono attraversare le membrane cellulari e penetrare facilmente all'interno dell'organismo.

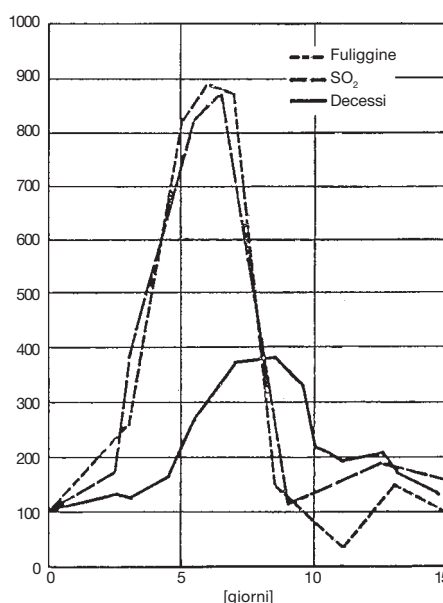
Inalando gli scarichi non diluiti dei motori diesel, ogni alveolo assume circa 1000 particelle al minuto, ossia circa 10 particelle per alveolo e minuto con la rarefazione consueta sul luogo di lavoro (1:100). È tanto o è poco?

Dopo 30 minuti d'esposizione a gas di scarico rarefatti (vale a dire solo 300 particelle per alveolo, una quantità infima), le prove eseguite con adulti sani mostrano già l'inizio di reazioni flogistiche nei polmoni, mentre che dei fenomeni di sovraccarico si manifestano solo dopo decenni anche in caso di inalazione concentrata.

Le misure di protezione usuali, come maschera o filtri per cabine, sono praticamente inefficaci contro le particelle così fini. La loro efficacia non scende di regola al disotto di 1 μm .

3. Rischi per la salute dovuti a polveri fini

Il fenomeno non è proprio del tutto nuovo.



Curve superiori: aumento della fuliggine e di SO₂
Curva inferiore: aumento dei decessi

Figura 2: Relazione tra inquinamento dell'aria e decessi durante un episodio di smog a Londra nel 1952

Fonte: EPA, workshop aprile 1996

Nel 1952 si è già osservato a Londra una coincidenza eloquente tra inquinamento atmosferico e decessi spontanei durante episodi di smog provocati dai prodotti di combustione dei riscaldamenti domestici e dei motori a scoppio. Si sono osservati pure fenomeni a lungo termine, fino a carcinomi polmonari, che da allora sono stati oggetto di studi epidemiologici molto approfonditi, di sperimentazioni su animali (in vitro) e su cellule (in vitro), basati

su popolazioni particolarmente esposte ed eseguiti su scala mondiale. Questo processo di ricerca è lungi dall'essere concluso, e il numero di studi più ampi e dettagliati non cessa di crescere a misura che la preoccupazione aumenta.

Gli studi svizzeri SAPALDIA (adulti) e SCARPOL (bambini) [2] hanno evidenziato che i sintomi e le infezioni a livello di vie respiratorie aumentano quasi proporzionalmente all'incremento del carico di particelle dell'aria ambiente. In presenza dell'assai modesta crescita di $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ della concentrazione di polveri fini, come la si incontra continuamente anche in zone molto pulite, ci si devono attendere gli effetti seguenti:

decessi prematuri, totale	4.4%
incapacità di lavoro	10 %
bronchite nell'adulto	25 %
bronchite nel bambino	35 %
disturbi alle vie respiratorie (bambini)	54 %

Questi effetti impressionanti e inquietanti dell'inquinamento atmosferico sulla salute in Svizzera sono stati analizzati per la prima volta nel 1996 (GVF 272). In totale l'inquinamento dell'aria comporta ogni anno 3'800 decessi prematuri, 53'000 bronchiti nei bambini e 791'000 giorni d'incapacità di lavoro. Esso provoca inoltre oneri assai notevoli per l'economia pubblica, come mostra la figura che segue:

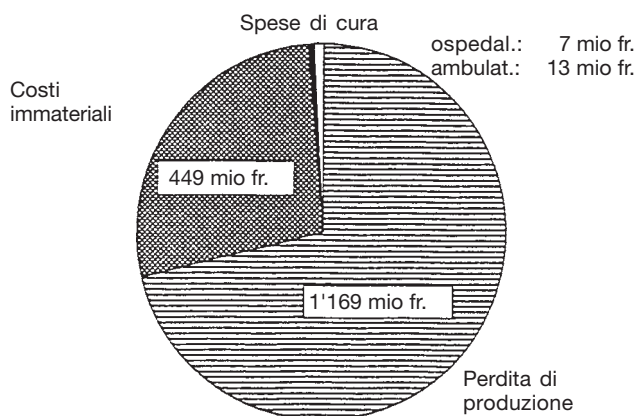


Figura 3: Costi esterni della salute in Svizzera
Fonte: GVF 272/1996 [1]

Tali calcoli si fondano sugli effetti dell'inquinamento atmosferico dovuti a polveri fini sino a una granulometria di $10 \mu\text{m}$, dette PM10, nella totalità della loro composizione materiale. Per il momento si può solo supporre fino a che punto vi contribuiscano le emissioni ivi contenute di singole fonti, in particolare dei motori diesel per autoveicoli con le loro particelle finissime e praticamente insolubili. Vi è tuttavia il fondato sospetto che esse abbiano un ruolo primordiale in materia di rischi per la salute.

4. Le polveri fini nella medicina del lavoro

La medicina del lavoro si interessa da sempre del tema «polveri, fumi e nebbie», soprattutto a causa dell'impolveramento sotterraneo. Il tema è stato ancorato in modo assai uniforme sul piano internazionale con valori limite resi costantemente più severi. Ben presto si sono elaborate chiare idee e convenzioni per i settori di definizione inalabilità, deposito nei polmoni e tossicologia. Già nel 1959, la Convenzione di Johannesburg prevedeva quindi di limitare lo studio alle particelle inalabili inferiori a $5 \mu\text{m}$, più tardi si sono aggiunti il criterio della difficile solubilità e anche la presa in considerazione della tossicità delle diverse sostanze. Quale criterio particolarmente severo vale la classificazione come «probabilmente cancerogeno per l'uomo» gradualmente introdotta in numerosi paesi dal 1988 per il particolato diesel; tutte le normative moderne esigono ormai imperativamente la minimizzazione di questa sostanza nociva «secondo lo stato della tecnica».

La figura che segue, tratta dai documenti di MAC 97, mostra in modo efficace come la probabilità del depositarsi di particelle finissime aumenti fortemente più le dimensioni diminuiscono, soprattutto quando esse sono non igroscopiche, come la fuliggine diesel. Ciò corrisponde all'aumento della loro «mobilità» sotto l'influsso del moto molecolare browniano. Teoricamente si suppone un influsso quadratico tenendo conto della cosiddetta correzione di Cunningham. Il rischio diventa allora evidente.

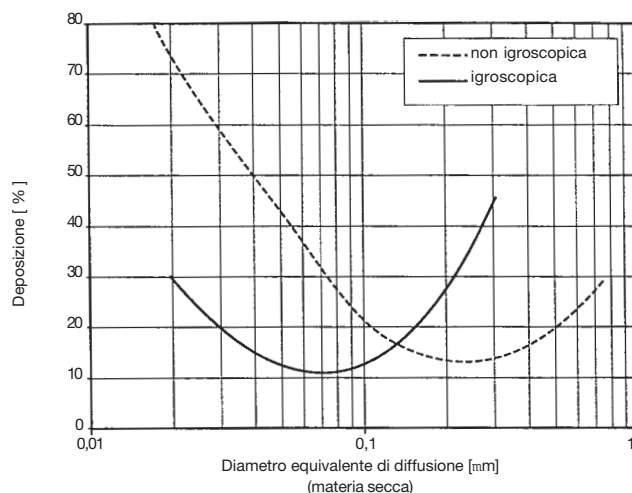


Figura 4: Probabilità di deposito di particelle finissime a livello alveolare [3]

Queste infime particelle non contribuiscono praticamente al peso della massa globale di particelle. È perciò solo coerente che le particelle di questo ordine di grandezza non siano valutate solo se-

condo la loro massa, ma soprattutto anche secondo il loro numero nel senso di una «concentrazione numerica» o allora secondo la loro superficie globale. Dato che tutti i processi biologici dipendono fortemente dalle caratteristiche della superficie, questa viene qui giudicata sempre più importante.

5. Meccanismi di danneggiamento

Ogni particella che non viene evacuata ed entra in contatto con la superficie di una cellula epiteliale polmonare scatena un processo reattivo che può essere di natura allergica o infiammatoria. Sembra chiaro che più il numero di cellule toccate è alto, vale a dire più le particelle si accumulano e restano a lungo in contatto con le superfici cellulari a livello alveolare, più questo processo è violento. Le reazioni che si manifestano sotto forma di cellule infiammatorie e enzimi speciali riscontrabili nel liquido bronchiale, in caso di azione più intensa possono insorgere anche sotto forma di sintomi come starnuti, tosse, espettorato, peggioramento dei valori funzionali ed episodi asmatici, perfino di insufficienza cardiocircolatoria nelle persone più anziane e malate. Le particelle finissime sono però anche in grado di attraversare l'epitelio polmonare. Come mostra la figura seguente, esse penetrano nei capillari del sistema sanguigno e nei vasi linfatici e si infiltrano così praticamente dappertutto nell'organismo; molte di esse sarebbero perfino abbastanza piccole da poter attraversare la cosiddetta barriera cerebrale. La molteplicità dei danni che possono essere provocati dal particolato diesel non è ancora per nulla chiarita in tutti i dettagli.

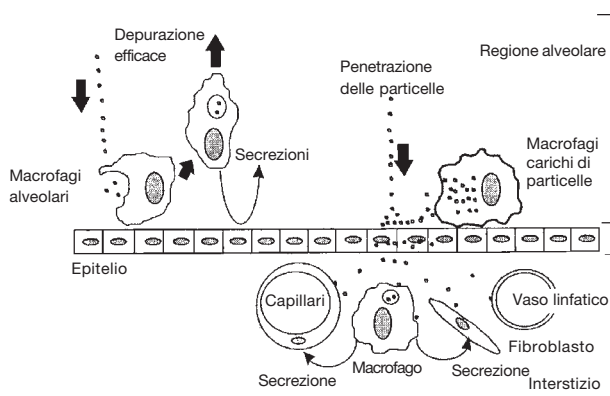


Figura 5: La via delle particelle nell'organismo
Fonte: Donaldson [4]

Dagli esami epidemiologici si sa comunque che le particelle finissime non danneggiano solo i polmoni ma possono scatenare effetti acuti nocivi anche nel sistema vascolare, per esempio aumentando la viscosità del sangue. I test su animali secondo

Oberdörster [6] indicano che le particelle particolarmente fini (attorno a 30 nm) sono molto più aggressive delle particelle attorno a 250 nm. Anche le osservazioni su asmatici fatte da Wichmann/Erfurt [5] hanno evidenziato che le particelle ultrafini sono le principali responsabili di questi effetti altamente nocivi. Negli USA si è perfino osservato che in caso di forte concentrazione di particelle nell'aria ambiente si manifesta una proporzione inquietante di aritmie cardiache nei soggetti già lesi (infartuati). Si suppongono molteplici effetti morbosi tra cui, negli ultimi tempi, anche quelli delle tracce di metalli pesanti che provengono dalla combustione, capaci di formare particelle a sé stanti alle quali possono aderire le particelle di fuliggine. Qui si parla soprattutto dei metalli detti di transizione, di cui fa parte ad esempio anche il ferro. Gli studi epidemiologici mostrano inoltre, e non è una sorpresa, che la frequenza degli infortuni cresce con l'aumentare dell'inquinamento atmosferico.

6. Regole e valori limite

I valori limite legali d'immissione si riferiscono di regola al volume d'aria (mg/m^3), i valori limite d'emissione invece all'energia (g/kWh) o al percorso (g/km). Nello specchio che segue sono indicati in modo semplificato per permettere comparazione:

Emissioni (particolato totale TPM):

- Macchine da cantiere EU1, 116 mg/m^3
- Macchine da cantiere EU2, 50 mg/m^3
- Autocarri EURO 2, 17 mg/m^3
- Autocarri (prop. 22.12.98) EURO 4/5, 3 mg/m^3
- Motore diesel stazionario OIAt 98 5 mg/m^3

Immissioni (div. definizioni: fuliggine, CE, CE+CO):

- Posto di lavoro MAC/CH 200 mg/m^3
- Posto di lavoro CIT/D 100 mg/m^3
- Posto di lavoro USA:
 - Proposta 95 160 mg/m^3
 - Proposta 98 50 mg/m^3
- Valore guida centro città/D 98 (fuligg.) 8 mg/m^3
- Aria esterna Svizzera 98 (PM10) 20 mg/m^3

Palesamente questi due campi presentano ancora differenze importanti quanto a definizione, metodo di misurazione e livello dei valori limite. L'elencazione fa comunque apparire la fortissima tendenza a inasprire drasticamente i valori limite, a causa della crescente preoccupazione quanto ai rischi per la salute dovuti alle particelle finissime, sia per le emissioni dei motori diesel che per la concentrazione nell'aria ambiente (immissione).

7. Fuliggine diesel

Per i medesimi motivi, nel quadro del progetto VERT si è investito molto per caratterizzare le particelle di fuliggine diesel. Coscienti della portata delle conclusioni, era importante conoscere la granulometria di queste particelle, la loro concentrazione numerica e, almeno approssimativamente, la loro composizione chimica. Inoltre era di massima importanza esaminare se questi reperti potevano essere generalizzati, ossia appurare la variazione di queste caratteristiche secondo i motori e le loro condizioni d'esercizio. Ciò ha forzatamente portato a uno studio assai vasto: si sono eseguite misurazioni in condizioni reali, sui banchi o rulli di prova a 10 motori di veicoli utilitari, per lo più tipici motori di macchine da cantiere, e a 5 motori diesel per auto. La figura che segue mostra un risultato tipico:

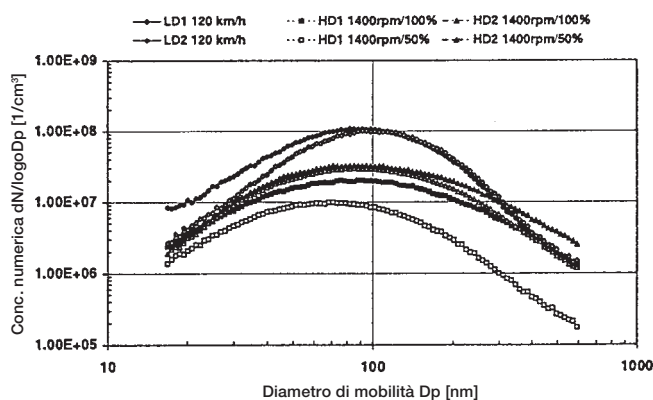


Figura 6: Granulometria delle particelle di fuliggine diesel di 2 motori di veicoli utilitari e 2 motori d'auto
Fonte: VERT [7]

Di regola si trovano concentrazioni numeriche assai uniformi con un picco attorno a 100 nm, quindi nel campo invisibile. Sorprende in un primo momento che le granulometrie si presentino così uniformemente per tutti i tipi di motori. Numerosi esami hanno confermato nel frattempo questa osservazione. Sembra essere un fenomeno generale della combustione di idrocarburi in condizione di marcia dei motori; oggi questo fenomeno può essere assai ben spiegato con rappresentazioni teoriche [8].

Oltremodo inquietante è il risultato [10] che i motori di nuova concezione sembrano non avere praticamente vantaggi rispetto a quelli più vecchi, anzi. Anche la tendenza attuale al miglioramento dei carburanti diesel (meno zolfo e aromatici, numero di cetani più elevato) non ha praticamente effetti visibili sulla granulometria e sulla concentrazione del particolato finissimo.

Impressionante è l'elevato tasso di concentrazione che nell'addizione su tutte le classi raggiunge sovente i 100 milioni di particelle per cm^3 e si trova quindi al limite della saturazione.

Il livello di conoscenze elaborate nel corso del progetto, che collimano ampiamente con i risultati di altre ricerche, permette di concludere che i motori diesel emettono concentrazioni elevatissime di particelle di carbonio abbastanza secche e idrofobe, con grande superficie frastagliata, in un campo di dimensioni che dal punto di vista dell'inquinamento dell'aria respirata va considerato particolarmente critico.

Per ridurre queste concentrazioni a una misura sostenibile, sarebbe necessaria una diluizione eccedente di molto le possibilità tecniche offerte dal rinforzo delle misure di ventilazione sui posti di lavoro nella costruzione di tunnel. Dobbiamo forzatamente concludere che il problema deve essere risolto alla fonte, vale a dire che solo una filtrazione molto efficace dei gas di scarico diesel può essere vista come un mezzo vantaggioso per ridurre l'emissione di particelle alla misura necessaria (fattore mirato >100) [11].

8. Proporzione di fuliggine diesel nell'aria ambiente

Si tratta naturalmente di sapere fino a che punto le emissioni diesel sono in genere responsabili della forte concentrazione di polveri fini nell'aria ambiente. A tale riguardo non vi è una risposta generale. I dati variano anzi notevolmente tra siti urbani e siti rurali in funzione del periodo dell'anno, dell'ora e della proporzione di motori diesel utilizzati.

Per la Svizzera, l'UFAFP [9] fornisce i dati della rete di misurazione NABEL che conformemente alla figura seguente risultano impressionanti perfino per un sito rurale come Payerne:

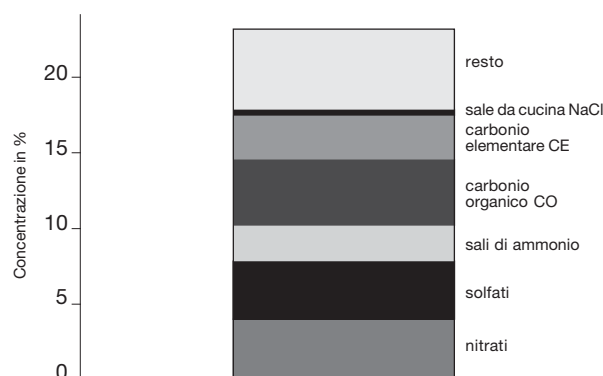


Figura 7: Composizione della polvere fine a Payerne
Fonte: UFAFP [9]

La proporzione di polvere fine proveniente da combustioni, rappresentata qui come carbonio elementare CE + carbonio organico CO, è pur sempre circa 1/3 delle immissioni PM10. Queste dovrebbero in gran parte provenire da emissioni diesel.

Per Los Angeles si indica una quota delle emissioni di particolato diesel pari al 36% della polvere fine, per New York addirittura pari al 53%, nonostante che in queste città solo poche auto sono notoriamente munite di motore diesel. Nelle metropoli molto più «dieselizzate» come Londra e Parigi il valore dovrebbe essere ancora più elevato.

Se questi dati si riferiscono di regola alla massa globale di tutte le particelle inferiori a 10 μm , il citato studio di Erfurt [5] tiene conto di particelle di dimensioni diverse. La figura seguente indica chiaramente che le particelle più fini (0.01–0.1 μm) non hanno praticamente più massa, ma presentano le concentrazioni numeriche più elevate, inversamente alle particelle più grosse. Lo studio sul comportamento degli asmatici esposti all'inalazione di particelle fini giunge alla conclusione che «gli effetti sulla salute devono essere attribuiti alle particelle più fini», cosa che dà un'indicazione chiara sul ruolo della concentrazione numerica e della superficie.

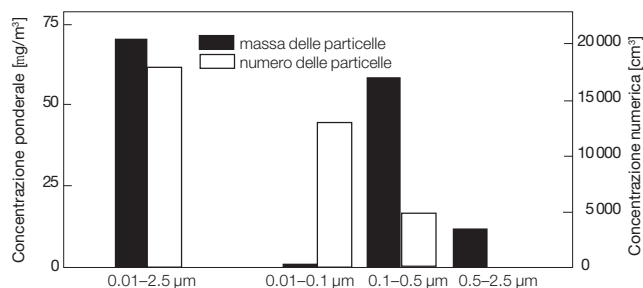


Figura 8: Ripartizione delle polveri urbane a Erfurt
Fonte: Wichmann [5]

9. Tecnica di misurazione

Per esaminare le emissioni di particelle diesel si sono impiegati finora soprattutto metodi che sfruttano il peso delle particelle o i loro effetti emettenti un segnale nel campo della luce visibile: o si pesano le particelle catturate su un filtro (gravimetria) o si misura l'opacimento di un raggio luminoso per assorbimento e riflessione (opacimetria). I due procedimenti legali sono applicati per la certificazione dei veicoli e per i controlli periodici.

Nessuno di questi procedimenti dà adeguatamente l'emissione di particelle di dimensioni attorno a 100 nm, in quanto esse non influiscono in modo notevole né sul peso né sull'opacimento.

D'altro canto, gli studi più recenti vedono ormai queste particelle, che fino allora erano state poco considerate, come i componenti più nocivi alla salute dell'emissione diesel: viene loro attribuita infatti una pericolosità potenziale molto superiore a quella delle particelle più grandi nel campo visibile, come le particelle nate per agglomerazione sulle quali si concentravano in precedenza gli sforzi della ricerca.

I metodi di misura correnti hanno un altro svantaggio: i gas di scarico si raffreddano rapidamente e permettono così la formazione di goccioline (condensati spontanei), p.es. da vapore acqueo e ossidi di zolfo, che vengono interpretate come particelle anche se materialmente non hanno nessuna similitudine con le particelle solide di fuliggine provenienti dalla combustione.

Tali particelle non si formano invece di regola nella realtà vista la grossa diluizione dei gas di scarico nell'atmosfera. Inoltre l'effetto tossico di tali condensati acidificati è giudicato come molto debole rispetto alle particelle solide. Si sono dovuti abbandonare detti metodi di misura che inducono a interpretazioni fuorvianti a causa di una vera e propria formazione di artefatti. Con l'aiuto del PFZ, dell'Ufficio federale di metrologia UFMET, dell'EMPA e dell'Istituto Paul Scherrer si sono impiegati metodi più moderni per caratterizzare la fuliggine, che permettono di classificare, analizzare e giudicare le particelle in funzione delle loro dimensioni e della loro superficie.

Tali nuove conoscenze tecniche applicate durante questi lavori hanno fatto nascere un metodo di misura che permette lo studio «on line» dell'emissione propriamente detta di particelle finissime dei motori diesel in condizioni reali e per diversi stati di funzionamento.

Questa tecnica di misurazione (NanoMet) sarà presentata in uno dei prossimi bollettini.

10. Interventi

Ricordiamoci che l'obiettivo è di ridurre del fattore 100 le particelle solide provenienti dai gas di scarico diesel per l'intero campo di dimensioni a partire da 10 nm (limite di misura).

Tutti i provvedimenti conosciuti, disponibili o immaginabili per un'applicazione pratica sono stati esaminati nella prospettiva dell'obiettivo fissato. Purtroppo si è qui dovuto constatare che:

- Perfino le generazioni più moderne di motori (come la cosiddetta tecnica d'iniezione «common rail», computerizzata, a elevate pressioni d'iniezione) non riducono l'immissione di particelle finissime e sembrano addirittura ridurre le dimensioni, per cui il rischio tende a crescere.
- Anche i carburanti più moderni, compresi i carburanti sintetici di grande purezza, integralmente senza zolfo e né aromatici, non riducono l'emissione di particelle finissime.
- Se non porta alcun vantaggio quanto alle particelle finissime, l'impiego di catalizzatori di ossidazio-

ne porta per contro svantaggi quanto a NO_2 e SO_3 che non possono essere accettati tenendo conto di criteri di medicina del lavoro.

- Anche altre misure come ottimizzazione della regolazione del motore, riciclo dei gas di scarico, raffreddamento dell'aria d'alimentazione e simili non hanno apportato nessuna diminuzione sostanziale delle particelle finissime.
- Il solo rimedio efficace consiste nell'utilizzare filtri antiparticelle, come quelli già descritti nel Bollettino 2. Questi filtri sono stati oggetto di un test completo sul terreno (vedi Bollettino 4).

Un risultato tipico:

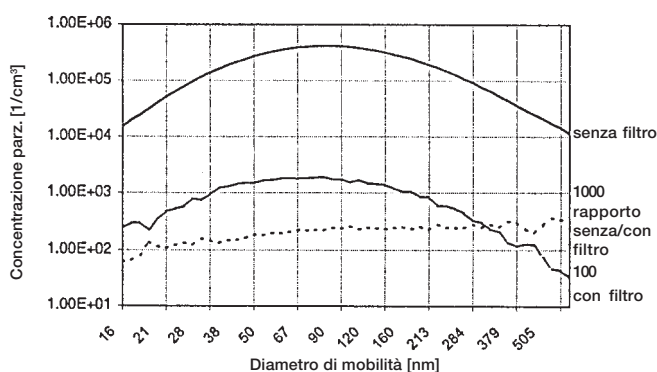


Figura 9: Emissione di particelle nei gas di scarico di una macchina da cantiere con motore Liebherr senza e con filtro antiparticelle. Fonte: VERT [10]

È rappresentata la concentrazione numerica di particelle solide in funzione delle loro dimensioni, con e senza filtro. La differenza delle due curve «gas grezzo/gas depurato» corrisponde al fattore 100–500, vale a dire che si ottiene un tasso di filtrazione del 99% perfino per le particelle più fini.

Questo è solo uno e nemmeno il migliore degli esempi. Taluni filtri raggiungono rendimenti di filtrazione superiori al 99%, anche per particelle <20 nm.

Questo tipo di filtri conviene per tutte le generazioni di motori diesel, qualunque siano le dimensioni o il tipo. Per principio sarebbe quindi possibile ridurre durevolmente la concentrazione di particelle nell'aria ambiente equipaggiando in un secondo tempo l'intera popolazione di motori nel settore mirato (tunnel, cantiere, centro città), cosa che permetterebbe di eliminare così sistematicamente anche le particelle ultrafini. Sui cantieri tedeschi per la costruzione di gallerie, dove secondo TRGS 554 tutti i motori diesel devono essere equipaggiati di filtri antiparticelle, si è visto nel frattempo che la concentrazione di particelle di fuliggine diesel nell'aria ambiente è scesa a valori inferiori a $0,1 \text{ mg/m}^3$, mentre prima dell'introduzione di questa misura si misuravano ancora concentrazioni fino a 2 mg/m^3 .

I filtri antiparticelle sono efficaci tanti in condizioni stazionarie quanto in accelerazione libera (in fase d'accelerazione massima del motore), come mostra la figura 10.

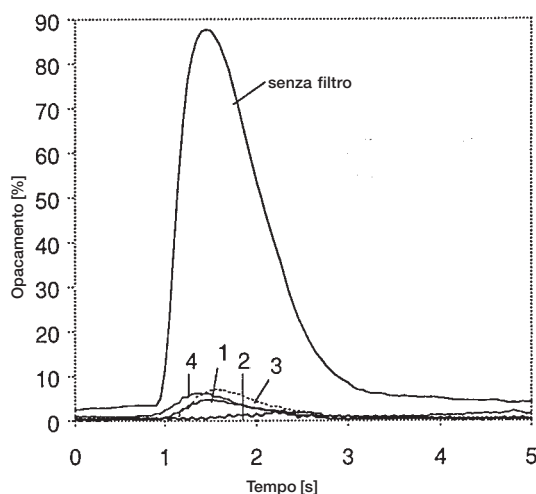


Figura 10: Accelerazione libera del motore Liebherr per macchine da cantiere, con diversi filtri (1–4) e senza filtro antiparticelle. Fonte: VERT [7]

11. Una visione: il motore diesel ultrapulito

Nei confronti di tutti i procedimenti noti di combustione per motori, la combustione termodinamica del motore diesel è la più completa e la migliore. Questo tipo di motore è quindi anche e di gran lunga il più economico. Sotto questo aspetto non è per nulla alla fine del suo sviluppo. Ci si deve invece aspettare che il progresso tecnico dei sistemi d'iniezione e di sovralimentazione porti ancora notevoli incrementi del rendimento anche per piccoli motori di veicoli diesel, in particolare quando non occorre fare compromessi a favore dell'emissione di gas di scarico. La parola chiave è: disaccoppiamento di combustione ed emissione di gas di scarico, ossia combustione ottimale e trattamento secondario efficace degli scarichi, come è il caso già da lungo tempo sul motore Otto con catalizzatore a tre vie. Come oggi il catalizzatore fa parte del motore Otto, in futuro il filtro antiparticelle dovrà appartenere al motore diesel, sicuramente completato passo dopo passo da provvedimenti catalitici per ridurre ulteriormente gli ossidi d'azoto.

Così il motore diesel difenderà e potenzierà la sua posizione di fronte a tutte le sostanze nocive per l'ambiente, CO incluso. Potrà essere considerato il motore più pulito sul piano ecologico ed economicamente il migliore.

Il presente bollettino, lungi dall'essere un argomento contro il motore diesel, sostiene lo sviluppo di questo motore la cui longevità è esemplare.

Bibliografia

1. B. Birgersson, Chemie und Gesundheit, VCH-Verlagsgesellschaft mbH, 1988, ISBN 3-527-26455-8
2. Monetarisierung der verkehrsbedingten externen Gesundheitskosten, GVF-Auftrag Nr. 272, Mai 1996
3. Valeurs limites d'exposition aux places de travail 1997 Concentrazioni massime ammissibili sul posto di lavoro di sostanze pericolose per la salute (valori MAC), Suva, gennaio 1997
4. Ultrafine (Nanometre) Particle Mediated Lung Injury Donaldson et al., J.Aerosol Sc. 5.6 1998
5. Respiratory Effects Are Associated with the Number of Ultrafine Particles, Wichmann et al. Maximilians Universität, München, 1997
6. Increased pulmonary toxicity of inhaled ultrafine particles: Due to lung overload alone? Oberdörster et al., Elsevier Sc. Publ., New York, 1994
7. Partikelfilter für die Nachrüstung von Baumaschinenmotoren, VERT-Abschlussmessungen und Umsetzung. SAE 1999-01-0116
8. Characterization of Carbon Particles in Diesel Exhaust in Relation to Environmental Protection L. Jing, EAM/Wabern,
9. Ambient PM10 in Switzerland Nyffeler et al., Environm. Congress, Durban, September 1998
10. VERT: Diesel Nano-Particulate Emissions: Properties and Reduction Strategies SAE 980539/1998
11. Bollettino VERT 3: Più aria o meno gas inquinanti? Luglio 1996

Abbreviazioni

AUVA	Allg. Unfallversicherungsanstalt/Autriche
CE	Carbonio elementare
CIT	Concentrazione indicativa tecnica
CO	Carbonio organico
EMPA	Laboratorio federale di prova dei materiali e di ricerca
EPA	Environment Protection Agency degli USA
GVF	Servizio per lo studio dei trasporti (SST)
MAC	Concentrazione massima sui posti di lavoro
µg	Microgrammo = 10 ⁻⁶ g
µm	Micrometro (micron) = 10 ⁻⁶ m
nm	Nanometro = 10 ⁻⁹ m
PM10	Particelle <10 µm
SAE	Society of Automotive Engineers
Suva	Istituto nazionale svizzero di assicurazione contro gli infortuni
TBG	Tiefbau-Berufsgenossenschaft
TPM	Total Particulate Matter
UFAFP	Ufficio federale dell'ambiente, delle foreste e del paesaggio
VERT	Verminderung der Emissionen von Realmaschinen im Tunnelbau (Riduzione delle emissioni prodotte da macchinari già in dotazione nella costruzione di gallerie), un progetto collettivo AUVA, Suva, TBG e UFAFP
VU	Veicoli utilitari

Direzione del progetto:

Studio d'ingegneria TTM, A. Mayer,
Fohrhölzistr. 14b, CH-5443 Niederrohrdorf
Tel. 0041(56) 496 6414 Fax 0041(56)496 6415
E-Mail: TTM.a.mayer@bluewin.ch

Commissione di progetto dei committenti:

AUVA: J. Weidhofer 0043(1-33111)584
ÖSBS: A. Schuster 0043(3842)24317-21
TBG: Prof. D. Kieser 0049(761)73135
Suva: W. Scheidegger 0041(41)419 5060
UFAFP: Max Wyser-Heusi (0041(31)322 9369

Ordinazioni di bolletini:

AUVA: Allgemeine Unfallversicherungsanstalt
Abteilung für Unfallverhütung und Berufskrankheitenbekämpfung
Adalbert-Stifterstr. 65, A-1200 Wien (signora Radosztics)
Tel. 0043(1-33111)418, Fax 0043(1-33111)347
Bestell-Nr. AUVA-Report 4/2

TBG: Tiefbau-Bauberufsgenossenschaft
Am Knie 6, D-81241 Monaco di Baviera
Tel. 0049(89)8897 505, Fax 0049(89)8897494

Suva: Istituto nazionale svizzero di assicurazione contro gli infortuni
Servizio centrale clienti, casella postale, 6002 Lucerna
Tel. 0041(41)419 5851, Fax 0041(41)419 5917