

SELEZIONE E CARATTERIZZAZIONE DI UNA POLVERE FINE

GIUSEPPE RIPANUCCI*

Introduzione

La natura e la granulometria del particolato aerodisperso [1] in un ambiente di lavoro dipendono rispettivamente dai materiali lavorati e dai trattamenti meccanici ai quali essi sono sottoposti e quindi sono specifici del tipo di attività che si svolge in quell'ambiente; la loro conoscenza è determinante per una valutazione, dal punto di vista sanitario, dei possibili rischi ai quali possono essere esposti i lavoratori.

È noto che quando i materiali ordinari sono costituiti da forme ultrafini tendono ad essere più reattivi, esattamente con lo stesso meccanismo per cui i catalizzatori eterogenei sono fondamentali nei processi delle grandi industrie chimiche: ad esempio, nell'intervallo dimensionale nanometrico <100 nm i materiali possono presentare proprietà sostanzialmente diverse da quelle possedute dagli stessi materiali con dimensioni maggiori. Tipicamente, aumentano il rapporto tra area superficiale e massa ed il numero per unità di massa e ciò comporta una maggiore reattività chimica, più resistenza o una più efficiente conducibilità elettrica e potenzialmente anche una più accentuata attività biologica.

È da tener conto inoltre che, come hanno dimostrato le analisi del particolato aerodisperso in ambiente urbano, al diminuire della granulometria varia la presenza percentuale dei vari componenti.

La via di esposizione più comune alle particelle aerodisperse negli ambienti lavorativi è quella inalatoria. I cinque meccanismi di deposizione del particolato nell'apparato respiratorio sono la sedimentazione, l'impatto inerziale, la diffusione, l'intercettazione e la deposizione elettrostatica. Per diffusione si depositano solo le particelle con diametro aerodinamico minore di 0,5 micrometri. La massima deposizione nella regione alveolare si ha per particelle di circa 2 μm di dia-

* Cattedra di Medicina del Lavoro, Università degli Studi di Roma "Tor Vergata".

metro aerodinamico e solo il 10-15% per quelle di 0,5 μm (le altre sono espirate senza depositarsi). Per particelle ancora più piccole però, per il meccanismo della diffusione, le probabilità di deposizione sono maggiori. A seguito della deposizione, il destino delle particelle dipende dalla loro biopersistenza e quindi dalla loro natura. (Figura 1).

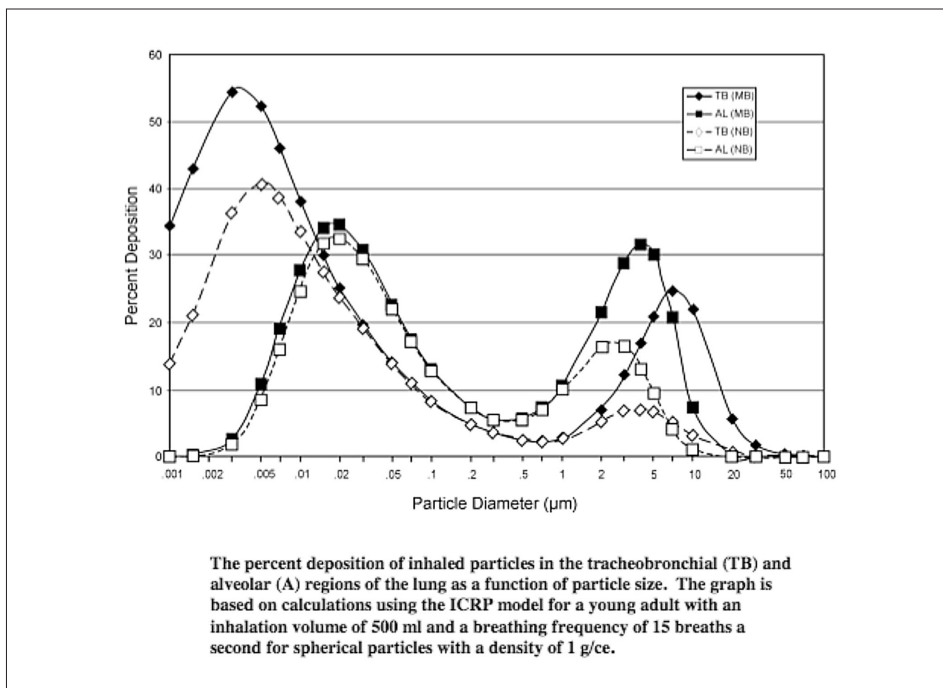


Fig. 1: Deposizione percentuale nel corpo umano delle particelle inalate. [3]

C'è un'evidenza sperimentale considerevole che le particelle sono anche tossiche nei confronti dei sistemi biologici in misura crescente al decrescere del loro diametro. Benché le particelle ultrafini abbiano un'area superficiale minore rispetto a quella delle più grossolane (0,03 μm^2 , 19,6 μm^2 , 314 μm^2 rispettivamente per particelle di 0,1 μm , 2,5 μm , 10 μm , considerandole sferiche), le particelle ultrafini sono presenti in numero molto superiore, con un conseguente contributo superficiale potenzialmente significativo tale da determinare la causa determinante della tossicità [2]. Inoltre, le particelle più grossolane si depositano per impatto nelle vie ciliate e sono rapidamente allontanate, mentre le ultrafini sedi-

mentano prevalentemente per diffusione negli alveoli dove la clearance è molto minore. Il particolato di dimensioni nanometriche, poi, passa direttamente dall'alveolo polmonare alla circolazione sanguigna; dal sangue agli organi il passo è breve, soprattutto se si pensa che esse entrano anche nei globuli rossi, un ottimo cavallo di Troia per superare ogni barriera. Uno strumento per campionare le frazioni toracica, respirabile e ultrafine di una polvere aerodispersa è il VACES (Versatil Aerosol Concentration and Enrichment System) [4] che seleziona particelle di diametro aerodinamico di 10-2,5 μm ("coarse" $\text{PM}_{10-2,5}$), 2,5 μm ("fine" $\text{PM}_{2,5}$) e 0,15 μm ("ultrafine" $\text{PM}_{0,15}$).

Scopo del presente lavoro è di presentare una metodica alternativa all'uso del VACES per selezionare dalla polvere aerodispersa la frazione, di natura esclusivamente minerale, più fine di quella "respirabile" ed osservare la variazione, al diminuire della granulometria, della presenza percentuale dei singoli componenti.

Materiali e metodi

Presupposti teorici

Per ottenere la frazione fine della polvere si è ritenuto di poter far ricorso alla capacità dei cicloni di allontanare per centrifugazione le frazioni più grossolane. Infatti, i campionatori più comuni per le frazioni più fini della polvere si basano su preselettori che impiegano il principio del ciclone. I cicloni sono separatori centrifughi in cui l'aria che porta l'aerosol viene fatta ruotare attorno all'asse del ciclone; l'aria entra tangenzialmente nella zona cilindrica attraverso l'ugello o gli ugelli di ingresso, acquista poi un moto a elica discendente e risale infine lungo il condotto di uscita coincidente con l'asse del ciclone. Le particelle più grossolane precipitano sulle pareti del ciclone a causa della forza centrifuga e della maggiore inerzia e scivolano poi sul fondo dello strumento dove si accumulano. Le particelle più fini (frazione toracica o respirabile) risalgono verso l'alto, mantenendosi al centro del vortice, e sono raccolte su un filtro posizionato all'uscita del ciclone.

Un campionatore utilizzato per la frazione toracica è il ciclone GK2.69 operante ad un flusso di 1,6 litri/minuto che monta una cassetta porta filtro da 37 mm. Questo stesso ciclone può essere impiegato per il campionamento della frazione respirabile portando il flusso di aspirazione a 4,2 litri/minuto.

Altri cicloni frequentemente utilizzati per il prelievo della frazione respirabile sono il ciclone Higgins-Dewell (flusso = 2,2 litri/minuto), il ciclone di nylon da 10 mm Dorr-Oliver (flusso = 1,7 litri/minuto) e il ciclone GS3 della SKC dotato di tre ugelli di ingresso dell'aria aspirata (flusso = 2,75 litri/minuto).

Concettualmente sembrerebbe ovvio che all'aumentare del flusso di aspirazione la polvere campionata dovrebbe essere sempre più fine. È intuitivo però che

dovrebbe esserci un limite per ogni ciclone al di sopra del quale, pur aumentando il flusso di aspirazione, non si ottiene più una riduzione della granulometria della polvere. Si sa inoltre che un ciclone non può che selezionare le particelle di polvere in maniera differente in funzione della loro massa volumica (peso specifico): maggiore è questa, minore sarà la dimensione delle particelle non allontanate. In altre parole, a parità di concentrazione nell'aria, le particelle più fini ottenute con il ciclone saranno quelle di maggiore massa volumica (ρ).

Lo studio è stato condotto utilizzando il ciclone GS3 (Figura 2), in cui la presenza dell'ingresso dell'aria a tre vie consente di minimizzare gli effetti legati alla velocità del vento e all'orientazione rispetto alla sorgente inquinante.



Fig. 2: *Ciclone GS3 della SKC.*

Preliminari ricerche di letteratura hanno permesso di acquisire la pubblicazione *Calcolo Numerico e dimensionamento del Ciclone Separatore* che permette di calcolare il d_{50} in μm della polvere selezionata da un ciclone tipo variando il flusso di aspirazione e/o la massa volumica delle particelle.

Si ricorda che il diametro aerodinamico è definito come il diametro di una sfera di massa volumica 1 g/cm^3 con la stessa velocità terminale della particella sotto l'azione della forza gravitazionale in aria calma nelle stesse condizioni di temperatura, pressione e umidità relativa e che il d_{50} aerodinamico della frazione respirabile della polvere è posto pari a $4,25 \mu\text{m}$.

Con il ciclone di Figura 3 [5] questo d_{50} si ottiene con un flusso di aspirazione (1 F) di $0,180 \text{ m}^3/\text{s}$, con il GS3, ciclone molto più piccolo, con il flusso di 2,75 litri al minuto. Non è sembrato troppo azzardato ipotizzare che variando il flusso di aspirazione per valori multipli di quello di base, anche il GS3 possa selezionare una polvere con d_{50} simile a quella ottenibile con il “Ciclone Separator”. La costruzione di un ciclone segue infatti per tutte le sue parti i valori dimensionali univoci indicati da studi teorici le cui risultanze sono state validate da esperienze ultradecennali. D’altra parte, lo stesso operatore che ha messo a punto il software di calcolo che permette di ottenere per il “Ciclone Separator” valori di d_{50} in funzione del flusso di aspirazione e/o della massa volumica della polvere da selezionare non potrà che aver fatto ricorso a dati teorici e non a infinite sperimentazioni pratiche. Saranno comunque i rilievi gravimetrici e le osservazioni al SEM a convalidare o meno la nostra ipotesi.

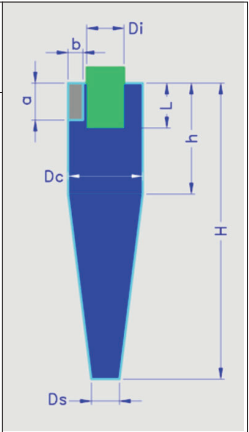
portata aria@20°C densità particelle	m^3/s kg/m^3	0,180 1000	
DC	m	0,447	
a	m	0,137	
b	m	0,137	
Di	m	0,167	
h	m	0,4	
L	m	0,15	
H	m	1,72	
Ds	m	0,107	
(d_{50})	μm	4,2	

Fig. 3: Calcolo del rendimento (d_{50}) del “Ciclone Separator”.

La Tabella 1 che segue raccoglie l’ampia serie di calcoli eseguiti con il software proposto nella pubblicazione citata per il ciclone tipo di Figura 2.

Tabella 1

d_{50} di particelle di massa volumica $\rho = 1 \text{ g/cm}^3$ in funzione del flusso di aspirazione e d_{50} in funzione della massa volumica delle particelle e del flusso di aspirazione

Flusso di aspirazione	d_{50} (μm)	Massa volumica (g/cm^3)	Variazione del d_{50} in funzione della massa volumica e del flusso di aspirazione	
			Flusso 1 F	Flusso 5 F
			d_{50} (μm)	
1 F	4,2	0,8	4,6	1,4
1,5 F	3,4	1,2	3,8	1,2
2,0 F	2,9	1,6	3,3	1,1
2,5 F	2,6	2,0	2,9	0,9
3,0 F	2,4	2,4	2,7	0,8
3,5 F	2,2	2,8	2,5	0,8
4,0 F	2,1	3,2	2,3	0,7
4,5 F	2,0	3,6	2,2	0,7
5,0 F	1,9	4,0	2,1	0,6

Sperimentazione

La fase sperimentale dello studio inizia con la preparazione di una miscela di campioni in polvere (circa 5 grammi ciascuno) di:

- allumina (Al_2O_3 , $\rho = 3,94 \text{ g/cm}^3$)
- calcare naturale puro (CaCO_3 , $\rho = 2,70 \text{ g/cm}^3$)
- quarzo (SiO_2 , $\rho = 2,6 \text{ g/cm}^3$)
- gesso naturale ($\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{ H}_2\text{O}$, $\rho = 2,3 \text{ g/cm}^3$)
- *minerale di ferro* (i due principali minerali di ferro, magnetite e ematite hanno una massa volumica di 5,2 - 5,3 g/cm^3).

Dopo essere stata omogeneizzata per 5 minuti con molinetto *IKA A11 basic*, la miscela è stata immessa in una camera a polvere.

Procedura A

Preliminarmente si è prelevata su un filtro in policarbonato (filtro n°1P) la frazione inalabile della polvere utilizzando un campionatore tipo CIS (*Conical Inhalable Sampler*) collegato ad una pompa Casella modello Apex operante ad un flusso di 2,75 litri/minuto: è stata impolverata la camera con un soffiaggio durato 1 minuto; si è proceduto quindi all'aspirazione della polvere per 10 minuti.

Procedura B

Due cicloni modello GS3 sono stati caricati con filtri in policarbonato: il ciclone con il filtro n° 2_P è stato collegato ad una pompa Casella modello Apex operante ad un flusso di 2,75 litri/minuto (prelievo della frazione respirabile della polvere aerodispersa); per il collegamento del secondo ciclone (caricato con il filtro n° 3_P) invece si è fatto ricorso alla pompa TCR Tecora modello Bravo regolata ad un flusso di 13,6 litri/minuto (circa 5 volte la portata della pompa Apex).

Dopo aver impolverato la camera (soffiaggio per 1 minuto), prima di accendere le pompe per la classazione delle polveri con i due cicloni, si sono attesi 15 minuti per permettere la sedimentazione delle particelle più grossolane, particelle che avrebbero potuto rendere imprecisa la classazione da parte dei due cicloni. Questo tempo di attesa è stato valutato tenendo conto della velocità di sedimentazione di particelle sferiche ($\rho = 1 \text{ g/cm}^3$) in aria calma di Tabella 2.

Tabella 2

Velocità di sedimentazione di particelle sferiche ($\rho = 1 \text{ g/cm}^3$) in aria calma.

diametro (μm)	cm/minuto
50	451
10	18
5	4,51
1	0,21
0,5	0,06
0,1	0,002

Le due pompe sono state quindi accese contemporaneamente e sono state lasciate in funzione continuativamente per circa 30 minuti. Identica procedura è stata poi eseguita dopo aver sostituito i filtri in policarbonato con filtri d'argento prepesati (filtro n°1_{AG}) nel ciclone collegato alla pompa Apex (flusso di 2,75 litri/minuto) e filtro 2_{AG} nel ciclone servito dalla pompa Bravo (flusso 13,6 litri/minuto). La seconda pesata dei filtri in argento ha dato piena conferma all'ipotesi principale di partenza (campionamento di una polvere di granulometria molto più fine della respirabile), con dati analitici ponderali perfettamente in linea con i valori teorici ipotizzati in Tabella 2.

La Tabella 3 riassume i dati di questa determinazione gravimetrica.

Tabella 3

Parametri dei campionamenti e risultati.

N° filtro in argento	Campionamento			Polvere	
	Flusso (litri/minuto)	Tempo (minuti)	Volume (litri)	Sul filtro (mg)	Polverosità (mg/m ³)
1 _{AG}	2,75	29,5	81,2	1,3	16
2 _{AG}	13,6	29,5	400	0,9	2,25

La concentrazione della frazione *fine* della polvere è quindi appena il 14% (2,25/16 x 100) di quella della frazione respirabile. Un risultato molto interessante se si tiene conto che la frazione selezionata ha un d_{50} dell'ordine di 0,8 μm , corrispondente ad un ρ medio della miscela stimato pari a 2,4 g/cm^3 (vedi Tabella 2) e che si tratta quindi di particelle di peso singolarmente quasi trascurabile, ma estremamente numerose, come mostra la curva di Figura 3: la nostra polvere, che avrebbe un diametro aerodinamico teorico d_{50} pari ad 1,9 μm avrebbe quindi una granulometria nettamente inferiore, non solo alla frazione respirabile, ma anche a quella con $d_{50} = 2,5 \mu\text{m}$ di figura. Nel proporre tali curve il WHO ricorda che "It may also be important to specify the number of particles present in each of several specific size ranges per unit volume of air". In altre parole, è il numero elevatissimo di particelle presenti in questi range dimensionali a determinare l'aumento del peso con un massimo attorno al diametro aerodinamico $d_{50} = 0,4 \mu\text{m}$.

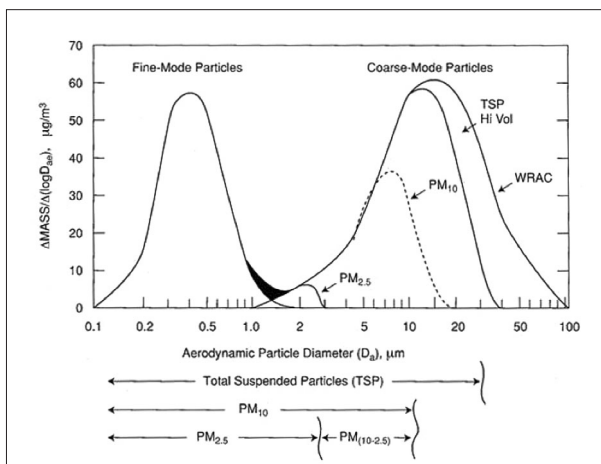


Fig. 4: Distribuzione del peso delle particelle presenti nell'aria urbana in funzione del diametro [6].

Verifiche al SEM

Tutte le analisi in microscopia elettronica sono state realizzate sull'intera superficie della schermata in osservazione in modo da ottenere un valore medio della composizione delle singole particelle presenti nella schermata stessa.

Minerale di ferro

La microanalisi del campione denominato *minerale di ferro*, ha mostrato, detratti carbonio e ossigeno, la seguente composizione elementare percentuale: ferro (59,7%), calcio (23,5%), silicio (9,4%) e, in subordine, alluminio (2,8%), magnesio (1,8 %), manganese (2,0%) e zolfo (0,7%). Non si tratta pertanto di un minerale di ferro puro.

Frazioni inalabile, respirabile e fine

Preliminarmente si è osservato che è del tutto evidente la differente granulometria delle tre frazioni, ad ulteriore conferma dell'ipotesi di partenza sul comportamento dei due cicloni al variare dei flussi di aspirazione.

Risultati delle analisi sulle frazioni della polvere

La Tabella 5 pone a confronto la composizione elementare, detratti carbonio ed ossigeno, delle tre frazioni di polvere.

Tabella 5

Peso percentuale degli elementi presenti nelle tre frazioni di polvere.

Elementi	Frazione inalabile	Frazione respirabile	Frazione fine
Mg	n.r.	n.r.	n.r
Al	22,78	24,28	31,44
Si	36,70	34,53	31,06
S	10,61	10,76	10,82
Ca	23,63	24,18	21,77
Mn	n.r.	n.r.	n.r
Fe	6,28	6,24	4,89

Magnesio e manganese, presenti solo in tracce nel *minerale di ferro*, non sono stati rilevati nelle frazioni di polvere aerodispersa.

L'alluminio è l'elemento che ha il maggiore incremento con il ridursi della granulometria. Con evidenza, ha avuto un'influenza determinante, come atteso, la maggiore massa volumica dell'allumina ($3,94 \text{ g/cm}^3$) rispetto a quelle del quarzo ($2,6 \text{ g/cm}^3$), del calcare ($2,7 \text{ g/cm}^3$), e del gesso ($2,3 \text{ g/cm}^3$). Intervengono però anche altri fattori quali la differente granulometria della polvere di partenza aerodispersa, la durezza, la frantumabilità, la friabilità o altro.

Sintomatici in tal senso sono i valori del silicio: l'elevata percentuale di questo elemento nell'inalabile è presumibilmente dovuta ad una più fine granulometria nel campione di quarzo messo in miscela, mentre la riduzione delle percentuali dall'inalabile all'ultrafine consegue la ben nota ridotta frantumabilità del quarzo. Per quanto riguarda i valori del ferro, sembra prevalere l'influenza della durezza (Mohs 5,5 - 6,5).

Modesta è infine la variazione nelle tre frazioni granulometriche delle percentuali dei restanti elementi.

Rappresentano una conferma, di notevole valenza, dell'influenza del peso specifico delle singole particelle sull'incremento percentuale nell'ultrafine, i risultati di un'indagine condotta con l'utilizzo del VACES sulle polveri aerodisperse nell'ambiente in sottosuolo di una linea ferroviaria metropolitana [7]. Tutti i metalli dosati nelle tre frazioni granulometriche (ferro, rame, cromo, zinco e manganese) hanno mostrato la concentrazione maggiore nella frazione ultrafine. Ad esempio, nelle tre frazioni il ferro è risultato rispettivamente: $407 \pm 43 \text{ mg/g}$ nel grossolano, $404 \pm 70 \text{ mg/g}$ nel fine e $484 \pm 82 \text{ mg/g}$ nell'ultrafine; il rame: $21,9 \pm 2,5 \text{ mg/g}$, $20,7 \pm 3,9 \text{ mg/g}$ e $25,4 \pm 4,3 \text{ mg/g}$. Per i restanti metalli i risultati sono analoghi. La componente metallica sarebbe stata superiore al 40% della massa totale del particolato aerodisperso. Si nota che quest'ultimo dato non è in linea con quelli da noi rilevati negli ambienti della metropolitana di Roma: in tutte le postazioni indagate si sono ottenuti sempre percentuali inferiori al 20% [8].

Conclusioni

Lo studio condotto ha dimostrato la possibilità teorica e pratica di selezionare in modo semplice ed efficace una frazione del particolato aerodisperso più fine non solo della respirabile ($d_{50} = 4,25 \text{ }\mu\text{m}$) ma anche di quella del $\text{PM}_{2.5}$ cioè $d_{50} = 2,5 \text{ }\mu\text{m}$. Il diametro aerodinamico medio (valutato per estrapolazione di elaborazioni analitiche di letteratura) della nostra polvere ultrafine dovrebbe essere $d_{50} = 1,9 \text{ }\mu\text{m}$, teoricamente corrispondente, nel caso della miscela di minerali impiegati nella sperimentazione condotta, ad un diametro medio reale delle particelle selezionate pari a un $d_{50} = 0,8 \text{ }\mu\text{m}$. A convalida della validità dell'ipotesi che ci ha indotto a ricorrere all'estrapolazione di dati prodotti da altri, le gravimetrie hanno

dimostrato che con la nostra camera a polvere si è ottenuta una concentrazione della frazione fine di appena il 14% di quella della respirabile; inoltre, anche le osservazioni al microscopio elettronico hanno messo in netta evidenza la differenza tra le granulometrie delle due frazioni di polvere.

Le analisi al SEM hanno permesso di constatare che nella componente minerale fine selezionata da un ciclone prevalgono i minerali a maggiore massa volumica: differente frantumabilità, friabilità e durezza possono però influire in maniera determinante. Una conferma, di notevole valenza, dell'influenza del peso specifico delle singole particelle sull'incremento percentuale nell'ultrafine, è data dai risultati di un'indagine sull'aerodisperso in un ambiente metropolitano [8]: tutti i metalli (materiali ad elevato peso specifico) rilevati hanno mostrato la concentrazione maggiore nella frazione ultrafine.

La natura e la granulometria del particolato aerodisperso in un ambiente di lavoro dipendono rispettivamente dai materiali lavorati e dai trattamenti meccanici ai quali essi sono sottoposti e quindi sono specifici del tipo di attività che si svolge in quell'ambiente. Le variazioni percentuali nel fine nell'ultrafine non possono che essere specifiche del singolo ambiente e le variazioni percentuali non sempre sono prevedibili con valutazioni teoriche.

Del particolato aerodisperso negli ambienti di lavoro la parte di natura minerale generata meccanicamente, come quella da noi immessa nella camera a polveri, non sempre rappresenta la componente prevalente; ma lo stesso particolato non ha nemmeno una caratterizzazione paragonabile a quella di una polvere urbana. La ricerca scientifica si è fin ora interessata di esaminare le frazioni fini ed ultrafini delle sole polveri urbane (es. ISPRA 2010) [9]. Mancano invece approfondimenti sulla polvere fine dei normali ambienti di lavoro di tipo industriale, approfondimenti che con la metodica qui messa a punto sarebbero, oltre che possibili, anche auspicabili, in quanto possibili forieri di risultanze inattese e quindi di sicuro interesse ai fini sanitari.

RIASSUNTO

La ricerca scientifica si è fin ora interessata di esaminare le frazioni fini ed ultrafini delle sole polveri urbane. Mancano invece approfondimenti sul fine e ultrafine dei normali ambienti di lavoro di tipo industriale. Scopo del presente studio è stato quello di selezionare la frazione fine di una polvere aerodispersa di natura esclusivamente minerale ed osservare la variazione, al diminuire della granulometria, della presenza percentuale dei singoli componenti.

In laboratorio una miscela a quattro componenti di polvere minerale è stata risolta in camera a polvere e classata con un ciclone operante al flusso indicato per il prelievo della frazione respirabile e ad un flusso cinque volte superiore. Per gravimetria si è rilevato che la concentrazione della polvere fine ottenuta era del 14%

di quella del respirabile; le osservazioni al SEM hanno messo in netta evidenza le due differenti granulometrie. Le microanalisi hanno mostrato che nella composizione del fine selezionato dal ciclone prevale il minerale a maggiore massa volumica, ma possono influire in maniera determinante durezza e frantumabilità dei materiali di partenza: tutte caratteristiche specifiche del singolo ambiente di lavoro, la cui frazione fine della polvere aerodispersa andrebbe quindi di volta in volta appositamente rilevata, con risultati di sicuro interesse ai fini sanitari.

SUMMARY

Until now scientific research has interested the exam of fine fractions and ultrafine only of urban dust. Instead, there is no widenings about fine and ultrafine dusts of usual work environments of industrial type. Aim of this study was the select the fine fraction of a aero-scattered dust, exclusively of mineral origin and to observe, on reducing of granulometry, the variation of presence of the separate components, in percentage.

In the laboratory a four components blend of mineral dust has been raised in a dust-room ad classified trough a cyclone working with flow marked for the drawing of respirable fraction and with flow five time higher. Using gravimetric analysis, it is obtained that the concentration of fine dust was 14% of respirable; observation trough SEM have already pointed out two different granulometries. Microanalysis have proved that in the composition of fine dust selected by cyclone is prevalent the mineral with higher mass of a volume unit, but hardness and crushing of starting materials may affect in decisive way: all these specific characteristics of single environment of work, which fine fraction of aero-scattered dust should be time to time purposely measured, with results of sure benefits in the medical field.

BIBLIOGRAFIA

- [1] UNI EN 48, 1994: *Atmosfera nell'ambiente di lavoro. Definizione delle frazioni granulometriche per la misurazione delle particelle aerodisperse.*
- [2] PETERS A., WICHMANN H.E., TUCH T., HEINRICH J., HEYDER J.: *Respirator effects are associated with the number of ultrafine particles*, in *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, 1997, 155, (4), 1376-1383.
- [3] U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, Aprile 2002-Third External Review Draft of Air Quality Criteria for Particulate Matter, Vol II *Air Quality Criteria for Particulate Matter*, pag. 9-147.

- [4] KIM S., JAQUES P.A., CHANG M.C., BARONE T., XIONG C., FRIEDLANDER, S.K., SIOUTAS C.: *Versatil Aerosol Concentration and Enrichment System (VACES) for simultaneous in vivo and in vitro evasluatio of toxic effect of ultrafine, fine and corse ambient particles*, Part II: Field evaluation, in *Journal of Aerosol Scienze*, 2001, 32, (11), 1299-1314.
- [5] <http://www.cicloniseparatori.com/calcoli.php> *Calcolo Numerico e dimensionamento del Ciclone Separatore*.
- [6] USEPA: *Air quality criteria for particulate matter*, Volume 1. US Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, N.C. (April 1996) EPA/600/P-95/001aF, 1996.
- [7] LOXAM M., COOPER M., GERLOFS-NIJLAND M., CASSE F., DAVIS D., PALMER M., TEAGLE D.: *Phycochemica Characterization of Airborne Particulate Matter at Mainline Underground Railway Station*, Articolo del 02-Nov-2012 sotto esame per la pubblicazione sul *Journal Environmental Science & Tecnology*.
- [8] RIPANUCCI G., GRANA M., VICENTINI L., BERGAMASCHI A.: *Dust in the underground railway tunnels of an italian town*, in *Journal of Of Occupational and Environmental Hygiene* 2006, 3, (1), 16-25.
- [9] ISPRA, *Qualità dell'ambiente urbano*, VII Rapporto, edizione 2010.