

Contributo dei meccanismi di cattura elettrostatici all'efficienza di filtrazione di facciali filtranti

The contribution of electrostatic effect on the performance of filtering facepiece respirators

Carmela Plebani*, Stefano Listrani, Marco Di Luigi

ISPESL, Dipartimento Igiene del Lavoro, Laboratorio Mezzi personali di protezione delle vie respiratorie - Monte Porzio Catone (RM)

*Corresponding author:

Carmela Plebani, ISPESL-DIL, Via Fontana Candida, 1, 00040 Monte Porzio Catone (Roma), Italy; Fax: + + 39 06 94181419; Ph. + + 39 06 94181501; E-mail: carmela.plebani@ispesl.it

Most filtering facepieces are made of electrically charged filtering materials. This paper assesses the contribution of electrostatic capture mechanisms to the filtering efficiency of some commercially available filtering facepieces.

Filtering facepieces from two different manufacturers were studied. For each manufacturer FFP1 and FFP2 filtering facepieces were examined. Penetration of monodisperse DEHS aerosol through the filtering facepieces was measured in the range $0.02 \div 0.40 \mu\text{m}$ before and after the removal of the electric charge from the filtering material.

For all the facepieces the charge removal caused a penetration increase and a shift of the most penetrating particle size from lower than $0.07 \mu\text{m}$ to larger than $0.15 \mu\text{m}$ diameters. The maximum contribution to filtering efficiency by electrostatic capture mechanisms ranged between 36% and 53%. This was at particle diameters of 0.20 or $0.30 \mu\text{m}$ whereas it was much lower for the smallest particles in the studied range.

In the studied range, except for the smallest particles, the presence of the electrostatic capture mechanisms is basic for the protection offered by the filtering facepieces. A significant difference in technical design between the two manufacturers was noted: in a case FFP2 filtering facepieces showed a mechanical filtering efficiency greater than FFP1, in the other case the mechanical filtering efficiency was about the same for facepieces of different classes. The efficiency reduction caused by electric charge removal was different for each facepiece. This reduction was not related to the class of the facepieces but depended on the technical designs used by the manufacturers.

Key words: electrostatic filter, filter penetration, oily aerosol, charge removal

La maggior parte dei facciali filtranti antipolvere è costituita da materiale filtrante fibroso caricato elettricamente. Scopo del lavoro è valutare il contributo dei meccanismi di cattura elettrostatici all'efficienza filtrante di alcuni facciali reperibili in commercio.

Sono stati studiati facciali filtranti di due diversi fabbricanti. Per ciascun fabbricante sono stati esaminati facciali di classe FFP1 e FFP2 attraverso cui è stata misurata la penetrazione di aerosol di DEHS monodisperso nell'intervallo $0,02 \div 0,40 \mu\text{m}$ prima e dopo la rimozione della carica elettrica.

La rimozione della carica ha causato, per tutti i facciali analizzati, un aumento della penetrazione e uno spostamento del diametro di massima penetrazione da diametri inferiori a $0,07 \mu\text{m}$ a diametri superiori a $0,15 \mu\text{m}$.

La protezione offerta dai facciali filtranti nel range studiato si basa in maniera rilevante sulla presenza di fenomeni di cattura elettrostatici. È emersa una significativa differenza nella tecnica progettuale dei due fabbricanti: in un caso i facciali di classe FFP2 hanno mostrato un'efficienza meccanica superiore a quelli FFP1, nell'altro l'efficienza meccanica era simile per le due classi. La perdita di efficienza causata dalla rimozione della carica elettrica dalle fibre non è correlata alla classe di appartenenza ma dipende piuttosto dalle tecniche progettuali utilizzate dal fabbricante.

Introduzione

Il ricorso all'uso dei dispositivi di protezione individuale ai fini della tutela della sicurezza e della salute dei lavoratori sul luogo di lavoro è obbligatorio quando permane un rischio nonostante siano stati attuati tutti gli interventi volti alla sua eliminazione o riduzione [D.L. 81, 2008]. Quando il rischio residuo è rappresentato da inalazione di materiale particellare aerodisperso, in assenza di specifiche esigenze, è comune il ricorso all'uso di dispositivi di protezione delle vie respiratorie di tipo filtrante, in particolare di facciali filtranti.

La maggior parte dei facciali filtranti oggi in commercio sono costituiti da materiali filtranti in cui le fibre sono caricate elettricamente, detti "filtri elettrostatici" [Chen e Huang, 1998]. Dal punto di vista macroscopico quasi tutti i filtri elettrostatici sono elettricamente neutri mentre, a livello microscopico, presentano una separazione di carica che è responsabile dell'attrazione di particelle aerodisperse [Brown, 2001]. In questo tipo di materia-

li filtranti l'attrazione elettrostatica assume un ruolo importante nella cattura delle particelle. Essa è in grado di agire sia sulle particelle cariche che sulle particelle neutre: la cattura di particelle cariche avviene per attrazione coulombiana da parte delle cariche elettriche di segno opposto presenti sulle fibre, mentre le particelle neutre vengono catturate a seguito del fenomeno di polarizzazione. La deposizione elettrostatica opera contemporaneamente ai meccanismi di rimozione di tipo meccanico (impatto, intercettazione, diffusione) ed ha l'effetto di esaltare l'efficienza del filtro [Brown, 1993].

I filtri elettrostatici presentano valori di caduta di pressione inferiori rispetto a filtri di pari efficienza ed area superficiale che catturano le particelle esclusivamente con meccanismi meccanici, detti "filtri meccanici" [Barrett e Rousseau, 1998]. La possibilità di poter associare un'alta efficienza di filtrazione con una bassa resistenza respiratoria influisce positivamente sull'accettabilità del dispositivo da parte dell'utilizzatore ed ha determinato la crescente diffusione di materiali elettrostatici nella realizzazione di facciali filtranti.

Se i filtri elettrostatici vengono mantenuti in condizioni di temperatura e umidità tipicamente indoor, la distribuzione della carica sulle fibre è stabile e rimane inalterata per lunghi periodi di tempo, anche anni [Brown, 2001; Viscusi et al., 2009]. Tuttavia, prove condotte in laboratorio hanno mostrato che le cariche elettriche di filtri elettrostatici esposti a radiazioni ionizzanti o conservati ad elevate temperature associate ad elevata umidità relativa [Brown, 1993; Ackley, 1985; Cheng et al., 2006] subiscono una totale o parziale neutralizzazione che causa la degradazione dell'efficienza filtrante. I filtri elettrostatici sono risultati soggetti a perdita di efficienza anche durante esposizione a flussi di aerosol [Barrett e Rousseau, 1998; Kanaoka et al., 1984; Martin et al., 2006; Tennial et al., 1991; Plebani et al., 2010], in questo caso la degradazione è stata attribuita ad un indebolimento del campo elettrico attorno alle fibre dovuto all'accumulo delle particelle catturate [Brown, 2001; Otani et al., 1993].

La potenziale degradazione delle prestazioni filtranti dei materiali elettrostatici con l'esposizione a flussi di aerosol ha recentemente indotto il CEN (Comitato Europeo di Normazione, organismo cui è demandato il compito di elaborare le norme tecniche armonizzate in materia di dispositivi di protezione individuale) ad aggiornare la norma EN 149:2001 [UNI EN 149:2003] che definisce i requisiti prestazionali dei facciali filtranti antipolvere. La norma aggiornata EN 149:2001+A1:2009 [UNI EN 149:2009], pur non tenendo conto della natura dei materiali filtranti utilizzati per realizzare i facciali, introduce nuove modalità di prova che prevedono la misura della penetrazione attraverso essi durante esposizioni di lunga durata a flussi di aerosol. Scopo del presente lavoro è valutare il contributo dei meccanismi di cattura elettrostatici all'efficienza di filtrazione di facciali filtranti reperiti in commercio misurandone la penetrazione prima e dopo la rimozione della carica elettrica dal materiale filtrante.

Materiali e Metodi

La penetrazione attraverso i facciali è stata misurata con un Fractional efficiency filter tester TSI 3160. L'apparato di misura, descritto più approfonditamente in [Plebani et al., 2005], è costituito essenzialmente da un generatore di aerosol, un analizzatore di mobilità differenziale (DMA, TSI), una camera di prova e due contatori di particelle a nuclei di condensazione (CNC, TSI), uno a monte e uno a valle della camera. Il generatore di aerosol unitamente al DMA fornisce, in successione, aerosol "quasi monodispersi" ($\sigma_g < 1,3$) cui viene impartita da una sorgente radioattiva di ^{85}Kr la distribuzione di carica descritta dalla teoria di Fuchs [Tsai et al., 2005]. Si è utilizzato un aerosol di bis(2-etil-lesil)sebacato (DEHS) con diametro delle particelle nell'intervallo $0,02 \div 0,40 \mu\text{m}$ ad un flusso di 95 l min^{-1} . La camera di prova dello strumento è stata appositamente progettata per poter alloggiare facciali filtranti. Ciascun facciale, prima di essere analizzato, è stato incollato lungo il proprio bordo su una piastra di PVC con un foro sagomato che veniva inserita a tenuta nella camera di prova.

Per eliminare i meccanismi di cattura elettrostatici ed esaminare il comportamento del facciale nel caso in cui agiscano esclusivamente quelli meccanici è stato adottato il metodo che prevede l'immersione completa del facciale in isopropanolo. Infatti questo trattamento si è rivelato particolarmente efficace per rimuovere la maggior parte delle cariche elettrostatiche dalle fibre lasciando inalterata la geometria del materiale filtrante [Chen e Huang, 1998]. La modalità di trattamento utilizzata prevedeva che il campione fosse immerso in isopropanolo per 60 minuti e lasciato asciugare per 24 ore a condizioni ambiente.

Il confronto tra il comportamento di un facciale in cui sono operanti sia i meccanismi di rimozione elettrostatici che quelli meccanici ed il comportamento dello stesso nel caso in cui sono operanti esclusivamente i meccanismi di rimozione meccanici, avrebbe richiesto di condurre le misure di penetrazione sullo stesso campione prima e dopo la rimozione della carica. Ciò è risultato poco praticabile sia per l'impossibilità di recuperare il campione dal supporto senza danneggiarlo sia per l'insorgenza di problemi di natura pratica connessi con l'immersione in isopropanolo del facciale fissato al supporto. La penetrazione di DEHS attraverso ogni tipo di facciale prima della rimozione della carica elettrica è stata quindi stimata mediando i risultati ottenuti su tre campioni appartenenti ad un unico lotto. Per evitare una eventuale variabilità imputabile a differenze tra lotti, la penetrazione dopo la rimozione della carica elettrica è stata valutata mediando i risultati ottenuti su altri tre facciali prelevati sempre dallo stesso lotto trattati preventivamente con isopropanolo.

Sono stati studiati quattro diversi tipi di facciali filtranti antipolvere reperiti in commercio certificati di classe FFP1 e FFP2 sulla base della norma UNI EN 149: 2003 [UNI EN 149 2003]. I facciali, prodotti da due diversi fabbricanti Y e Z, sono denominati nel seguito FFP1Y, FFP2Y, FFP1Z e FFP2Z con ovvio significato dei simboli. Come riportato nella nota informativa che accompagna i dispositivi, essi possono essere utilizzati, al massimo, per un turno di lavoro.

Risultati e Discussione

La figura 1 riporta, per ciascuno dei quattro tipi di facciali filtranti, la penetrazione percentuale media ottenuta sui tre campioni non sottoposti ad alcun trattamento (P) in funzione del diametro dell'aerosol di prova; tali valori si riferiscono al caso in cui siano presenti sia i fenomeni di cattura meccanici che quelli elettrostatici.

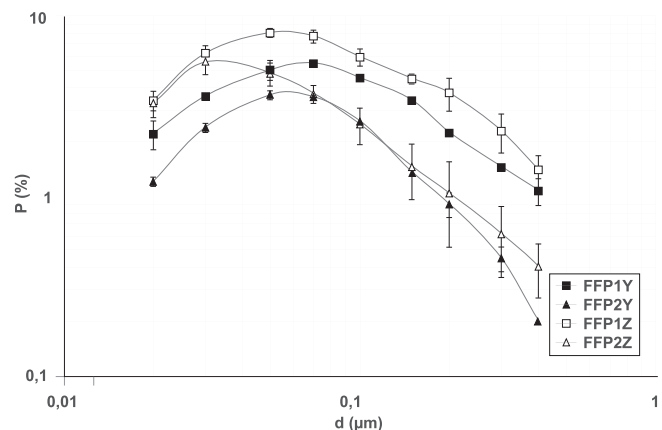


Figura 1: Penetrazioni medie ottenute per i facciali filtranti non sottoposti a trattamento con isopropanolo

La figura 2 riporta le analoghe informazioni per i facciali filtranti trattati con isopropanolo (PM); tali valori si riferiscono al caso in cui siano presenti unicamente i fenomeni di cattura meccanici. Dal confronto dei grafici di figura 1 e 2 è evidente che dopo il trattamento, tutti i tipi di facciali presentano un notevole aumento di penetrazione per tutti i diametri dell'aerosol utilizzato. Il massimo valore medio di penetrazione passa dal 5,5% al 46,6% per i facciali FFP1Y, dal 3,6% al 36,7%, dal 8,1% al 53,8%, dal 5,6% a 53,6%, per i facciali FFP2Y, FFP1Z e FFP2Z rispettivamente. Inoltre, prima del trattamento tutti i tipi di facciali mostra-

no un diametro di massima penetrazione inferiore a $0,07 \mu\text{m}$ mentre dopo il trattamento si riscontra uno spostamento del diametro di massima penetrazione oltre $0,15 \mu\text{m}$. Sia l'aumento della penetrazione che lo spostamento del massimo sono stati attribuiti alla neutralizzazione della carica delle fibre con conseguente perdita di efficacia dei meccanismi di cattura di tipo elettrostatico e sono stati interpretati applicando le relazioni per il calcolo dell'efficienza di singola fibra [Chen et al., 1993; Huang et al., 2007; Martin e Moyer, 2000].

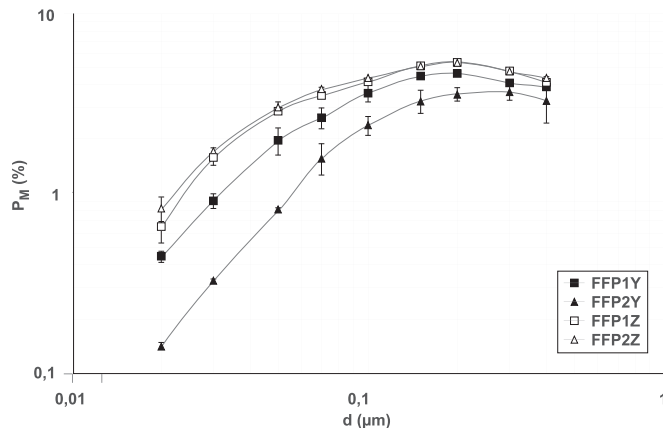


Figura 2: Penetrazioni medie ottenute per i facciali filtranti sottoposti a trattamento con isopropanolo

Si nota una differenza nel comportamento dei facciali prodotti dai due fabbricanti. La minor penetrazione media presentata dai facciali FFP2Z rispetto a quella dei facciali FFP1Z è attribuibile unicamente a un diverso apporto dei fenomeni di cattura elettrostatici. Infatti, la penetrazione media dei due facciali di diversa classe, ottenuta dopo la rimozione della carica elettrica, è risultata molto simile per tutti i diametri analizzati (figura 2). Invece, dopo i procedimenti di rimozione della carica, i facciali FFP2Y mostrano, per tutti i diametri analizzati, penetrazioni medie inferiori rispetto a quelle dei facciali FFP1Y, indicando che i due tipi di facciali, dal punto di vista meccanico, si comportano in maniera diversa. Prendendo in considerazione, per ciascun tipo di facciale, l'efficienza media prima e dopo la rimozione della carica elettrica, rispettivamente $E = 100 - P$ e $E_M = 100 - P_M$, dai dati riportati nelle figure 1 e 2 è stato calcolato, tramite la relazione:

$$\frac{(E - E_M)}{E} \cdot 100$$

il contributo percentuale dei fenomeni di cattura di tipo elettrostatico all'efficienza di filtrazione.

In figura 3 sono riportati i valori ottenuti per i quattro tipi di facciali. Per FFP1Y, FFP1Z e FFP2Z il massimo contributo alla cattura di particelle dovuto alla componente elettrostatica è stato osservato a $0,20 \mu\text{m}$ mentre per FFP2Y a $0,30 \mu\text{m}$. Tale contributo massimo all'efficienza totale è risultato differente per i diversi tipi di facciale e compreso tra il 36% calcolato per i facciali FFP2Y e il 53% calcolato per i facciali FFP2Z. Per le particelle più piccole nel range analizzato, il contributo elettrostatico all'efficienza totale è minore, risultando compreso tra lo 0,2% e il 4,2% per diametri di $0,02 \mu\text{m}$. Questi bassi valori del contributo indicano la prevalenza dei meccanismi di cattura meccanici; in particolare, per particelle di queste dimensioni, a velocità di flusso paragonabili a quelle adottate, solitamente prevale la cattura dovuta alla diffusione browniana [Brown, 1993; Huang et al., 2007]. La strumentazione utilizzata non ha permesso di investigare il comportamento dei facciali con aerosol di diametri maggiori di $0,40 \mu\text{m}$, tuttavia l'andamento dei dati di figura 3 sembra

indicare che oltre tale dimensione i meccanismi di cattura di tipo meccanico tendano a riacquistare importanza.

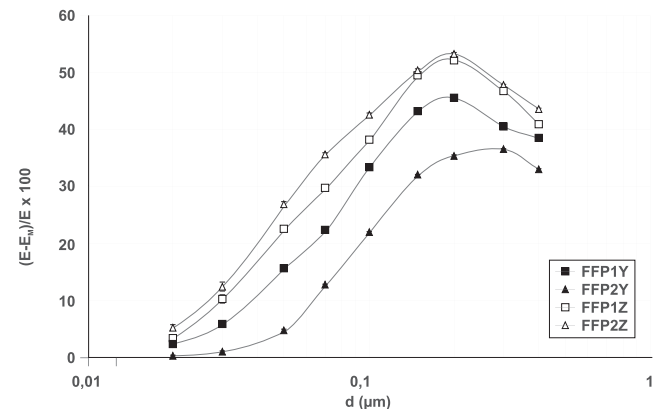


Figura 3: Contributo percentuale dei fenomeni di cattura elettrostatici all'efficienza dei facciali filtranti

Si può notare il diverso comportamento tra i facciali prodotti dai due diversi fabbricanti: i facciali FFP1Z e FFP2Z presentano, per tutti i diametri analizzati, un contributo all'efficienza di filtrazione dei meccanismi di cattura elettrostatici superiore rispetto ai facciali FFP1Y e FFP2Y. È evidente dal grafico che, per quanto riguarda i facciali Y, quelli di classe FFP1 presentano un maggior contributo elettrostatico rispetto a quelli di classe FFP2. Per quanto riguarda i facciali Z, i facciali di classe FFP2 presentano un contributo elettrostatico all'efficienza superiore a quello dei facciali FFP1 che, calcolato nel punto di massimo, corrisponde al 53% e al 52% rispettivamente. Si può notare come piccole differenze del contributo elettrostatico all'efficienza totale, a fronte di efficienze meccaniche simili, conducano a differenze apprezzabili tra i valori di penetrazione misurati sui facciali di diversa classe.

Conclusioni e raccomandazioni

La protezione offerta dai facciali filtranti esaminati in questo studio si basa in maniera rilevante sulla presenza di fenomeni di cattura di tipo elettrostatico. L'eliminazione delle cariche elettrostatiche ha comportato in tutti i tipi di facciali un aumento della penetrazione ed uno spostamento del massimo di penetrazione da diametri inferiori a $0,07 \mu\text{m}$ a diametri superiori a $0,15 \mu\text{m}$. Il massimo contributo percentuale all'efficienza dei fenomeni di cattura di tipo elettrostatico è risultato compreso tra il 36% e il 53% ed è stato osservato a $0,20$ o $0,30 \mu\text{m}$. Per le particelle più piccole nel range analizzato tale percentuale è risultata molto più piccola indicando che la cattura delle particelle è dovuta, in questo caso, prevalentemente a fenomeni meccanici.

È stata notata una significativa differenza nel comportamento dei facciali prodotti da due fabbricanti: in un caso la maggior efficienza dei facciali di classe superiore è stata attribuita unicamente alla maggiore entità del contributo elettrostatico all'efficienza totale. Nell'altro caso, invece, per il facciale di classe superiore è stata notata una più elevata efficienza meccanica. I risultati, inoltre, hanno indicato che la rimozione della carica elettrica dalle fibre ha causato una perdita di efficienza percentuale differente per ciascun facciale analizzato che non è correlata alla classe di appartenenza ma dipende piuttosto dalle tecniche progettuali utilizzate dal fabbricante.

Sebbene sia estremamente improbabile che in un luogo di lavoro si verificino circostanze tali che il materiale filtrante con cui

è realizzato il facciale perda completamente la propria carica elettrostatica, non si può escludere che possa verificarsi una riduzione di carica durante il suo utilizzo a causa della deposizione di aerosol. L'influenza della riduzione della carica elettrica sulle prestazioni dei facciali indica la necessità di rispettare quanto previsto dalla nota informativa che limita l'uso dei dispositivi esaminati, al massimo, ad un turno di lavoro.

È infine necessario ricordare che la protezione offerta da un facciale filtrante dipende, oltre che dalla penetrazione attraverso il materiale filtrante, anche da altri fattori. In particolare la tenuta al viso del bordo del facciale può, in alcuni casi, contribuire in maniera anche più rilevante alla perdita verso l'interno del dispositivo di protezione delle vie respiratorie.

Bibliografia

- Ackley, M.W., 1985. *Degradation of electrostatic filters at elevated temperature and humidity*. Filtration and Separation, **22** (4), 239-242.
- Barrett, L.W., Rousseau, A.D., 1998. *Aerosol loading performance of electret filter media*. Am. Ind. Hyg. Assoc. J., **59**, 532 - 539.
- Brown, R.C., Air filtration: an integrated approach to the theory and application of fibrous filters, Pergamon Press, England, Oxford 1993.
- Brown R.C., 2001. *Filtration in industrial hygiene*. Am. Ind. Hyg. Assoc. J., **62**, 633-643.
- Chen, C.C., Huang, S.H., 1998. *The effects of particle charge on the performance of a filtering facepiece*. Am. Ind. Hyg. Assoc. J., **59**, 227-233.
- Chen, C.C., Lehtimäki, M., Willeke, K., 1993. *Loading and filtration characteristics of filtering facepieces*. Am. Ind. Hyg. Assoc. J., **54** (2), 51-60.
- Cheng, Y.S., Holmes, T.D., Fan, B., 2006. *Evaluation of respirators filters for asbestos fibers*. J. Occup. Environ. Hygiene, **3**, 26 - 35.
- Decreto Legislativo 9 aprile 2008, n. 81 e s.m.i., *Attuazione dell'articolo 1 della legge 3 agosto 2007, n. 123, in materia di tutela della salute e della sicurezza nei luoghi di lavoro*. G. U. n. 101 del 30/ 04/ 2008 - Supplemento Ordinario n. 108.
- Huang, S.H., Chen, C.W., Chang, C.P., Lai, C.Y., Chen, C.C., 2007. *Penetration of 4,5 nm to 10 µm aerosol particles through fibrous filters*. J. aerosol sci., **38**, 719-727.
- Kanaoka, C., Emi, H., Ishiguro, T., Time dependency of collection performance of electret filters. In Lui, B.Y.H., Pui, D.Y.H., Fissan, H., Aerosol, Elsevier, Amsterdam, 613-616, 1984.
- Martin, S.B., Moyer, E.S., 2000. *Electrostatic respirator filter media: filter efficiency and most penetrating particle size effects*. Appl. Occup. Environ. Hyg., **15** (8), 609 - 617.
- Martin, S., Moyer, E., Jensen, P., 2006. *Powered air-purifying particulate respirator filter penetration by a DOP aerosol*. J. Occup. Environ. Hyg., **3**, 620-630.
- Otani, Y., Emi, H., Mori, J. 1993. Initial collection efficiency of electret filter and its durability for solid and liquid particles. Kona, **11**, 207-214.
- Plebani, C., Di Luigi, M., Caponi, M., 2005. *Efficienza di filtrazione di filtri antipolvere utilizzati nei respiratori in funzione della granulometria dell'aerosol*. Giornale degli Igienisti Industriali **30** (4), 253-259.
- Plebani, C., Listrani, S., Di Luigi, M., 2010. *Facciali filtranti: effetto dell'accumulo di aerosol oleoso sulla penetrazione attraverso il materiale filtrante*. Med. Lav., **101** (4), 293-302.
- Tennal, K.B., Mazumder, M.K., Siag, A., Reddy, R.N., 1991. *Effect of loading with an oil aerosol on the collection efficiency of an electret filter*. Part. Sci. and Tech., **9**, 19-29.
- Tsai, C.J., Lin, J.S., Deshpande, C.G., Liu, L.C., 2005. *Electrostatic charge measurement and charge neutralization of fine aerosol particles during the generation process*. Part. Part. Syst. Charact., **22**, 293-298.
- UNI EN 149, *Apparecchi di protezione delle vie respiratorie - Semimaschera filtrante contro particelle. Requisiti, prove, marcatura*, Ente Nazionale Italiano di Unificazione, Milano, 2003.
- UNI EN 149, *Dispositivi di protezione delle vie respiratorie - Semimaschere filtranti antipolvere. Requisiti, prove, marcatura*, Ente Nazionale Italiano di Unificazione, Milano, 2009.
- Viscusi, D.J., Bergman, M., Sinkule, E., Shaffer, R., 2009. *Evaluation of the filtration performance of 21 N95 filtering face piece respirators after prolonged storage*. Am. J. Infect. Control., **37** (5), 381 - 386.