

UN METODO PRATICO PER LA STIMA DELL'ESPOSIZIONE PREGRESSA AD INQUINANTI AERODISPERSI DI FIGURE PROFESSIONALI "BYSTANDER"

P. DE SANTIS, P. DESIDERI

INAIL – Direzione Regionale Lazio – Consulenza Tecnica Accertamento Rischi e Prevenzione

RIASSUNTO

Nel lavoro dell'Igienista Industriale ed in particolare del tecnico della Consulenza Tecnica Accertamento Rischi e Prevenzioni (CONTARP) può essere richiesto di valutare l'esposizione ad inquinanti aerodispersi di personale non direttamente coinvolto nella lavorazione sorgente dell'inquinamento. E' questo il caso ad esempio della valutazione dell'esposizione di quelle figure professionali quali supervisori, capituono, colleghi occupati in attività diverse da quella emittente, ecc. Il problema è facilmente risolvibile qualora sia possibile ricorrere al campionamento analitico dell'inquinante, sia esso, il campionamento, di tipo ambientale o di tipo personale. Di contro, il problema risulta invece complesso allorché sia impossibile effettuare il campionamento in quanto, ad esempio, si è chiamati a valutare, oggi per allora, l'esposizione pregressa a lavorazioni oramai dismesse e/o modificate. Tipica situazione è, ad esempio, la valutazione della esposizione da fibre di amianto nell'ambito della problematica del riconoscimento dei benefici previdenziali amianto (BPA). Il presente lavoro presenta un modello deterministico proposto nel 1999 dal dott. John W. Cherrie capace di poter stimare la esposizione di tali figure professionali, note le concentrazioni tipiche delle lavorazioni emittenti, le dimensioni principali del locale frequentato, il tempo medio di permanenza nel locale. Poiché il modello postula condizioni stazionarie, cioè una sorgente di emissione costante nel tempo, esso potrà essere utilizzato solo quando le condizioni reali siano abbastanza approssimabili a tale condizione ideale.

SUMMARY

During the work of the industrial hygienist in and in particular in some of the activities of CONTARP Consultant may be required to assess the exposure to airborne pollutants of personnel not directly involved in the working phase source of pollution. It is the case of those professionals such as supervisors, leaders, coaches, colleagues engaged in activities other than the one emitting the pollutant. The problem is easily solved if it is possible to analyze workplace atmospheres for the presence of pollutant, with environmental and/or personal sampling. On the contrary, the problem is rather complex when it is impossible to perform the sampling because, for example, there is the need to evaluate the previous exposure to pollutants emitted by working phases now disused and/or amended. This situation is typical, for example, in the technical assessment of exposure to asbestos fibers of these professionals as part of the procedure of recognition of security benefits in Italian law. This paper apply a deterministic model proposed in 1999 by Dr. John W. Cherrie able to estimate the exposure of these professionals, once known the typical concentrations of emitting working phases, the principal dimensions of workplace, the average time spent in the room. The model use a constant emission rate, so that it can be used only when the real exposure well approximates the ideal condition.

1. VALUTAZIONE DELL'ESPOSIZIONE AMBIENTALE

Il problema che si pone nell'analisi dell'esposizione di figure professionali quali supervisori, capituono, colleghi occupati in attività diverse da quella emittente, ecc., riguarda la quantificazione della concentrazione di inquinante esistente nelle zone circostanti, a distanze crescenti dalle postazioni di lavoro emittenti ed in generale in ambiente.

Nel prosieguo faremo riferimento ad un inquinante specifico e cioè alle fibre di amianto ma la trattazione, come si vedrà, può essere assolutamente generalizzabile a tutti gli inquinanti.

Il problema è particolarmente complesso poiché la dispersione delle fibre dipende da una molteplicità di parametri influenti sul moto delle particelle e sulla loro dispersione: geometria dei luoghi, velocità dell'aria (ventilazione forzata e/o moti convettivi), ricambi aria, diametro aerodinamico delle fibre, ecc.

D'altra parte tale problematica si riflette sulle differenze che si sono trovate storicamente tra le concentrazioni di fibre misurate tramite campionamento personale (cioè sull'operatore addetto alla lavorazione) e un contemporaneo campionamento ambientale eseguito a qualche metro dalla postazione di lavoro. Infatti è noto che i campionamenti effettuati in postazioni fisse all'interno dei luoghi di lavoro ma diverse dalla postazione in causa, sono sottostimanti la reale esposizione dell'operatore. Viceversa, possiamo quindi affermare che uguagliare la esposizione di un supervisore (by-stander) posto ad una certa distanza della postazione di lavoro a quella dell'operatore stesso, sovrastimerebbe l'esposizione del supervisore. Poiché in generale nella letteratura e/o nelle banche dati sono principalmente disponibili dati storici relativi a campionamenti personali, occorre trovare, se esistente, una correlazione che permetta, almeno con buona approssimazione, di passare dalle concentrazioni stimate e/o misurate sull'operatore addetto alla lavorazione emettente, alle concentrazioni prevedibili a qualche metro di distanza.

In un lavoro (Sherwood & Greenhalgh, 1960) gli autori hanno confrontato i risultati avuti dai campionatori personali con quelli statici per esposizioni a particelle radioattive. Essi hanno trovato che il campionamento fisso sottostima l'esposizione degli operatori approssimativamente di un fattore 5.

Altri autori (Cherrie, 1999; Cherrie & Schneider, 1999) hanno trovato tendenze simili, mostrando rapporti RC tra i valori di concentrazione rilevati mediante campionatori personali e quelli statici variabili tra 1,2 e 8,5 (vedi Figura 1).

Ancora, altri autori (Continisio et al., 2001) evidenziano che l'inquinamento da fibre (MMMF) aerodisperse decade rapidamente allontanandosi dalle sorgenti essendo dimostrato che i prelievi effettuati in postazioni fisse a circa 2 metri di distanza dagli operatori mostrano una riduzione dei valori di almeno un ordine di grandezza.

Cherrie (Cherrie, 2003) ha raccolto ed analizzato i dati pubblicati nel decennio precedente sulla rivista *Annals of Occupational Hygiene* relativi a campionamenti sia statici che personali di inquinanti di vario tipo, tra cui l'amianto. In Figura 2 è riportata una elaborazione statistica dei dati relativi a 40 diverse postazioni di lavoro, essendo stati esclusi dall'elaborazione quei dati dove era noto che il campionatore statico era stato comunque posizionato strettamente a ridosso della postazione di lavoro. In particolare in un diagramma logaritmico, è riportata la probabilità calcolata di avere un dato rapporto $RC = \text{concentrazione da campionatore personale} / \text{concentrazione da campionatore statico}$.

Comparison of personal exposure levels to fixed location monitors in the far-field

Substance	Situation	Ratio of personal to fixed location ^A	Reference
Asbestos	Simulated work in large store	8.5	2
Total dust	Processing uranium dust	5 ^B	1
Cotton	Cotton manufacture	4.5 ^C	6
Xylene	Rubber boot assembly	2.6	4
Inhalable dust	Flax spinning	2.6	7
Total dust	Soft paper production	1.8	8
Styrene	Glass-reinforced plastics manufacture	1.8	4
Para-aramid fibers	Various end uses, including spinning, carding, friction products, and composite manufacture	1.5	3
Man-made mineral fiber (fiber concentration)	Simulated work in small room	1.2	5

^ARatio of geometric mean exposure level to geometric mean of corresponding static sample concentrations, unless stated otherwise.

^BSummary statistic reported by authors.

^CRatio of median exposure level to median background concentration.

Figura 1: analisi di dati di letteratura su RC = rapporto delle concentrazioni rilevate da campionamento personale e statico (Cherrie, 1999)

Dalla Figura 2 si vede che il valore mediano del rapporto vale 1,5 e che nell'80% dei casi il rapporto è ≥ 1 . La probabilità del 95% è relativa ad un rapporto di circa 6. Si noti comunque che l'elaborazione è stata costruita per una molteplicità di inquinanti (asbesto, stirene, cotone, fibre minerali, ecc.) e non è specifica per l'amianto.

Pur nella convinzione che nel campo dell'igiene del lavoro le osservazioni possono essere raramente generalizzate, le predette tendenze sembrano confermate. La variabilità del rapporto fra le due tipologie di misure sembra dipendere principalmente dalla geometria del locale e dalla portata dell'aria di ventilazione, nel senso che il rapporto RC è crescente passando da una inesistente o scarsa ventilazione generale a condizioni di buona ventilazione forzata. I dati pubblicati sui campionatori personali e statici (Purdham *et al.*, 1993) sostengono questa analisi. Inoltre il rapporto RC è crescente per cubature del locale crescenti.

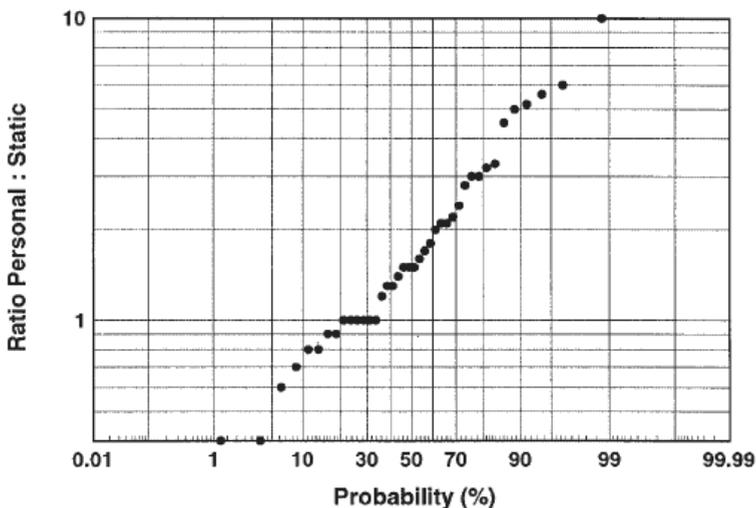


Figura 2: Diagramma logaritmico di probabilità del rapporto tra i valori medi dell'esposizione personale e le corrispondenti concentrazioni ambientali da campionamento statico (Cherrie, 2003)

Quindi per procedere con una certa accuratezza alla stima dell'esposizione delle predette figure professionali impegnate ad una certa distanza dalla fonte di fibre di amianto aerodisperse, occorre trovare le relazioni funzionali del predetto rapporto RC con tali variabili.

2. IL MODELLO

Il modello semplificato (Cherrie, 1999) analizza, in condizioni stazionarie, la dispersione degli agenti inquinanti dalla fonte usando due regioni spaziali teoriche: il campo vicino (near-field), definito come il volume nell'intorno dell'operatore intento nella postazione di lavoro, ed il campo lontano (far-field) che contiene il resto dell'ambiente. Il campo vicino è generalmente stimato in un volume di spazio di circa di 8 m³, tipicamente un cubo di lato 2 m, centrato rispetto alla testa dell'operatore. In questo modello, si considera che la ventilazione generale del locale abbia un effetto sulla concentrazione dell'agente inquinante nel campo lontano, ma non nel campo vicino.

Il modello applica il diagramma di flusso schematizzato in Figura 3, e considera tre componenti:

- l'emissione intrinseca delle fibre (ϵ_i)
- il metodo di manipolazione o di processo alla postazione di lavoro (h)
- l'efficienza dei mezzi di prevenzione primaria come ad esempio la ventilazione localizzata (η_{lv})

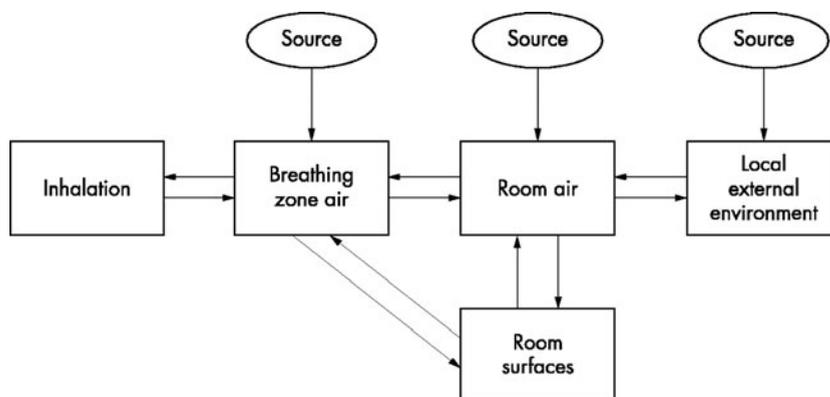


Figura 3: processo di esposizione (Cherrie, 2004)

L'emissione intrinseca è una proprietà del materiale in lavorazione: nel caso dell'amianto ad esempio un prodotto in matrice dura ha meno possibilità di rilasciare fibre rispetto ad esempio con una treccia o un materassino qualora sottoposti alla stessa modalità d'uso.

L'impatto delle modalità di processo e di manipolazione è probabilmente legata all'energia trasmessa al prodotto nocivo in lavorazione (Plinke *et al.*, 1991): ad esempio segnando un pezzo contenente amianto si liberano più fibre rispetto ad operazioni quali il sollevamento o l'impilamento dello stesso pezzo. Infine è indubbio che aspirazioni localizzate o altri accorgimenti di contenimento, contribuiscono a ridurre la concentrazione di fibre nell'ambiente di lavoro. Nella sostanza, la emissione attiva dalla postazione di lavoro può essere espressa dal prodotto:

$$\epsilon_a = \epsilon_i * h * (1 - \eta_{lv}) \quad \text{Equazione (1)}$$

L'emissione, comunque, può aversi anche da altre sorgenti dette passive o occasionali (ϵ_p) tipo dispersione da fall-out, dispersioni secondarie, urti accidentali, ecc., che non sono (o lo sono poco) influenzate dalla presenza di aspirazioni localizzate.

Infine due altri fattori sono importanti per determinare l'impatto di una sorgente sul valore esposizione di fibre nell'ambiente di lavoro:

- t_a : tempo di emissione della sorgente (durata dell'operazione a rischio),

- η_{ppe} : efficienza di dispositivi di protezione individuali (non intesi come DPI dell'apparato respiratorio ma piuttosto come DPI capaci di limitare la dispersione in aria, come tute monouso).
In definitiva per una sorgente vicina all'operatore si può descrivere il livello di concentrazione C come:

$$C = (\epsilon_i * h * (1 - \eta_{lv}) * t_a + \epsilon_p) * (1 - \eta_{ppe}) \quad \text{Equazione (2)}$$

Facendo riferimento alle due regioni spaziali teoriche del campo vicino (NF) e lontano (FF), e considerando che nel campo lontano il valore di esposizione è funzione anche della ventilazione generale del locale (d_{gv}) la precedente può essere riscritta sotto forma di:

$$C_{NF} = ((\epsilon_i * h * (1 - \eta_{lv}))_{NF} * t_{a,NF} + \epsilon_{p,NF}) * (1 - \eta_{ppe}) \quad \text{Equazione (3)}$$

$$C_{FF} = ((\epsilon_i * h * (1 - \eta_{lv}))_{FF} * t_{a,FF} + \epsilon_{p,FF}) * (1 - \eta_{ppe}) * d_{gv} \quad \text{Equazione (4)}$$

Il modello di esposizione può essere risolto considerando il bilancio di massa delle due regioni spaziali teoriche del campo vicino e del campo lontano (Figura 4) con le seguenti approssimazioni:

- sorgente posta nel campo vicino,
- assenza di sorgenti esterne.

Infatti si possono scrivere le seguenti equazioni differenziali:

$$V_{NF} * dC_{NF} / dt = E_T - C_{NF} * Q_{NF} + C_{FF} * Q_{NF} \quad \text{Equazione (5)}$$

$$V_{FF} * dC_{FF} / dt = C_{NF} * Q_{NF} - C_{FF} * Q_{NF} - C_{FF} * Q_{FF} \quad \text{Equazione (6)}$$

Dove:

V_{NF} e V_{FF} sono i volumi rispettivamente del campo vicino e del campo lontano,
 E_T è la portata di emissione in massa della sorgente (tutta contenuta nel campo vicino),
 Q_{NF} è la portata volumetrica (m^3/min) d'aria uscente ed entrante nel campo vicino,
 Q_{FF} è la portata volumetrica (m^3/min) d'aria di ventilazione generale.

I prodotti $Q * C$ rappresentano i flussi di massa di particolato entranti ed uscenti dalle due zone spaziali.

Q_{NF} può dipendere dalla aspirazione localizzata, in genere assente quando si analizzano lavorazioni degli anni '70 ed '80, e Q_{NF} dipendente dal movimento dell'aria per fenomeni convettivi dovuti, al minimo, dal calore prodotto dall'operatore durante la lavorazione. Il termine può essere stimato mediante una relazione semi-empirica (Kulmala, 1997; Welling *et al.*, 2001):

$$Q_{NF} = 0.0056 * q^{1/3} * x^{5/3} \quad \text{Equazione (7)}$$

Dove q = flusso di calore per convezione (W) stimabile in circa $45 \div 50$ W
 $x = 2$ m (dimensione del campo vicino)

Si ricava $Q_{NF} = 0,06 \text{ m}^3/s \approx 3,8 \div 4 \text{ m}^3/min$.

Comunque, la portata volumetrica d'aria uscente ed entrante nel campo vicino non è dovuta solo ai moti convettivi legati al calore emanato dall'operatore ma dipende anche da altri fattori, quali il calore dei pezzi in lavorazione, le turbolenze create dal movimento dell'operatore stesso, per cui si assume come più probabile il valore stimato in letteratura (Cherrie, 2003) di $10 \text{ m}^3/min$.

Il sistema di equazioni differenziali può essere risolto coi normali metodi numerici.

Nel già citato lavoro (Cherrie, 1999) si trovano tabulati i risultati della suesposta modellazione che sono sintetizzati anche nella seguente Figura 5

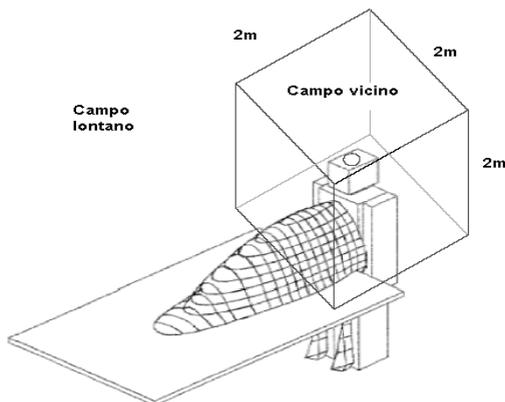


Figura 4: definizione delle due regioni spaziali teoriche del campo vicino e del campo lontano e simulazione dei moti termo convettivi (elaborato da Welling *et al.*, 2001)

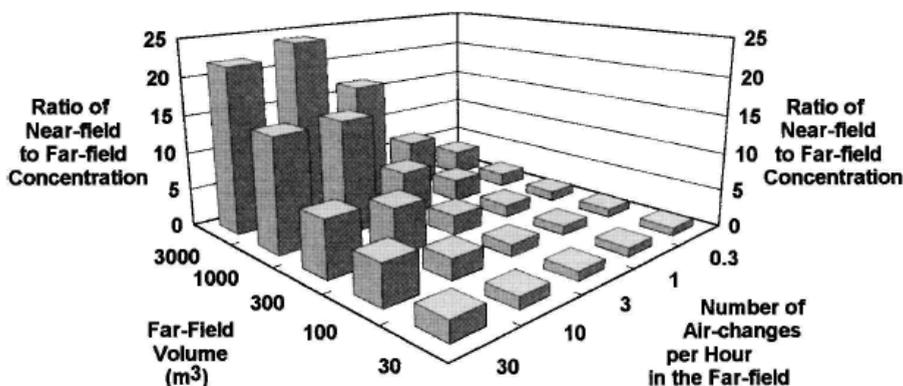


Figura 5: risultati della simulazione numerica del modello di diffusione delle fibre per $Q_{NF}=10 \text{ m}^3/\text{min}$ (Cherrie, 1999)

Il grafico tridimensionale mostra l'andamento del rapporto RC in funzione del volume del locale e del numero di ricambi d'aria del locale stesso (per un dato valore di portata d'aria fluente dal campo vicino). Si noti che per piccoli locali, con scarsi ricambi d'aria, il rapporto è prossimo ad 1 mentre per grosse volumetrie e scarsa ventilazione generale si ha $RC = 6,7$, dello stesso ordine di grandezza del valore di 8,5 riportato in Figura 1 per le stesse condizioni. Ciò testimonia la bontà del modello. Le tabulazioni di RC riportate in letteratura (Cherrie,1999) possono quindi essere utilmente utilizzate per stimare l'esposizione delle figure professionali tipo supervisori, capo squadra, ecc. Infatti, considerando la definizione del campo vicino, risulta altamente improbabile che tali figure professionali, nel loro lavoro di supervisione, abbiano potuto sostare per un tempo significativo nell'intorno di 1 metro calcolato dal centro della testa dell'operatore impegnato nella lavorazione sorgente di emissione. Si assume quindi che tali figure siano in generale esposti a valori di concentrazioni caratteristiche del campo lontano:

$$C_{FF} = C_{NF} / RC \tag{Equazione (8)}$$

dove C_{NF} è la concentrazione di fibre nel campo vicino caratteristica della lavorazione (le diverse concentrazioni sono ricavabili con le usuali metodologie di analisi).

ESEMPIO PRATICO

Si voglia valutare, almeno come ordine di grandezza, l'esposizione di un addetto supervisore di uno stabilimento in cui venivano svolte le operazioni con produzioni di fibre di amianto aerodisperse.

Si ipotizzi un reparto situato in capannone industriale con altezza utile di circa 5 metri e con cubatura pari a 3.000 m³. Si considerino effettuate nel locale 7 lavorazioni (L_i), posizionate su due file ai lati di un corridoio centrale di passaggio; il locale è scarsamente finestrato e ventilato in quanto confinato rispetto agli altri Reparti e privo di sistemi di ventilazione forzata.

Si considerino note le concentrazioni in campo vicino dovute alle sorgenti di emissione C_{NFi} (fibre/litro) ricavabili dalla letteratura o banche dati (es. Amyant), trascurando il contributo di immissione da lavorazioni svolte in campo lontano. Si considerino pure noti i tempi (in ore/anno) mediamente spesi dall'addetto per la supervisione di ciascuna lavorazione e/ postazione di supervisione in campo lontano.

Per la valutazione dell'esposizione complessiva del supervisore nel reparto si può utilizzare la formula:

$$\text{Esposizione} = \sum_i C_{FFi} * t_i / T = \sum_i (C_{NFi} / RC_i) * t_i / T \tag{Equazione (9)}$$

dove:

C_{FFi} = concentrazione in fibre/l nel campo lontano relativo alla lavorazione i-esima del Reparto

C_{NFi} = concentrazione in fibre/l nel campo vicino relativo alla lavorazione i-esima del Reparto

t_i = tempo in ore di prossimità alla lavorazione i-esima del Reparto (pari a t_i giornaliero * 240 gg /anno)

RC_i = rapporto tra le concentrazioni del campo vicino e lontano per la lavorazione i-esima

T = tempo medio lavorativo annuo assunto convenzionalmente in 1920 ore¹

I risultati dell'elaborazione sono riportati in Tabella 1, considerando un volume dell'ambiente di complessivi 3000 m³ e un numero di ricambi di aria orari pari a 1 per circolazione naturale in ambiente con scarsa finestratura, e trascurando il contributo di immissione da lavorazioni svolte in campo lontano.

Tabella 1: stima dell'esposizione E a fibre di amianto aerodisperse per addetto "bystander" in ambiente di circa 3000 m³ con 1 ricambio aria ogni ora (RC = 6,7)

Stabilimento	Reparto	Lavorazione	RC	C _{NFi} (fibre/ litro)	C _{FFi} (fibre/ litro)	t _i (ore/ anno)	E (fibre/ litro)
Stabilimento 1	Reparto 1	L1	6,7	3800	567	68	220
		L2		4000	597	135	
		L3		2500	373	203	
		L4		2500	373	473	
		L5		750	112	203	
		L6		700	104	135	
		L7		750	112	135	

BIBLIOGRAFIA

J.W Cherrie: The effect of room size and general ventilation on the relationship between near and far-field concentrations, 1999, Applied Occupational and Environmental Hygiene, volume 14.

J.W. Cherrie, T. Schneider: Validation of a new method for structured subjective assessment of past concentrations 1999, Annals of Occupational Hygiene, 43.

¹ Che può non coincidere con l'effettivo anno lavorativo standard pari a 1760 ore

R.J. Sherwood, D.M.S. Greenhalgh: A Personal Air Sampler, 1960, Annals of Occupational Hygiene, volume 2.

R. Continisio, L. Quaranta, F. Ruspolini, L. Taglieri : MMMF: mappatura del rischio in Umbria; 2001, Napoli, Atti del 19° Congresso Nazionale AIDII.

J.W. Cherrie: The Beginning of the Science Underpinning Occupational Hygiene, 2003, Annals of Occupational Hygiene, volume 47.

J.T. Purdham, P.R. Bozek, A. Sass-Kortsak: The evaluation of exposure of printing trade employees to polycyclic aromatic hydrocarbons, 1993, Annals of Occupational Hygiene, volume 37.

M.A.E. Plinke, D. Leith, D.B. Holstein, M.G. Boundy: Experimental examination of factors that affect dust generation, 1991. American Industrial Hygienists Association Journal, volume 52.

I. Kulmala: Calculation of Vertical Buoyant Plumes, 1997, Proceedings of Ventilation' 97.

I. Welling, I. Kulmala, I.M. Andersson, G. Rosen, J. Räisänen, T. Mielo, K. Marttinen, A. Säämänen, R. Niemelä: Extent of the Reverse Flow Wake Region Produced by a Body in a Uniform Flow Field, 2001, Applied Occupational and Environmental Hygiene, volume 16.

J.W. Cherrie: Personal and static sample measurements are related, 2004, Occupational and Environmental Medicine, volume 61.