

Debora Bellassai<sup>1</sup>, Antonio Spinazzola<sup>1</sup>, Stefano Silvestri<sup>2</sup>

## Stima della diffusione indoor di fibre di amianto con il modello diffusionale di Pasquill e Gifford per l'ambiente esterno

<sup>1</sup> Agenzia Regionale per le Protezione dell'Ambiente - Toscana

<sup>2</sup> Istituto per lo Studio e la Prevenzione Oncologica - Firenze

**RIASSUNTO.** Per superare il problema della valutazione dell'esposizione occupazionale pregressa, quando non siano disponibili risultati di monitoraggi indoor a suo tempo effettuati nelle lavorazioni di interesse, è stato messo a punto un modello che ricalca quello diffusionale di Pasquill e Gifford utilizzato correntemente per la stima delle concentrazioni di inquinanti a determinate distanze dalla sorgente (5, 8). Oggetto dello studio è la stima della diffusione quantitativa di fibre di amianto aerodisperse in funzione della distanza dalla sorgente in un'azienda metalmeccanica di costruzione di carrozze ferroviarie, durante il periodo della coibentazione a spruzzo della carrozzeria, trattamento che veniva effettuato in un grande capannone senza separazione dalle altre lavorazioni. L'applicazione del modello, date le caratteristiche della sorgente emissiva, ha consentito di stimare la diffusione quantitativa del particolato all'interno del locale evidenziando l'atteso decremento della concentrazione all'aumentare della distanza. Mediante opportuni calcoli la concentrazione in peso è stata convertita in numero di fibre / unità di volume, l'unità di misura correntemente utilizzata per la definizione dell'inquinamento da amianto (4).

**Parole chiave:** amianto, amianto spruzzato, stima quantitativa esposizione pregressa, modello diffusionale, ambienti confinati, rotabili ferroviari.

**ABSTRACT.** In absence of results of environmental monitoring to proceed with the assessment of occupational exposure, it was developed a model that retraces the one of Pasquill and Gifford, currently used for the estimation of concentrations of pollutants at certain distances from the source in outdoor environment (5, 8). Purpose of the study is the quantitative estimate of the diffusion of airborne asbestos fibers in function of the distance from the source in an factory where railway carriages were produced during the period when asbestos was sprayed as insulator of the body. The treatment was carried out in a large shed without separation from other operations. The application of the model, given the characteristics of the emitting source, has allowed us to estimate the diffusion of particles inside the shed with an expected decrease in concentration inversely proportional to the distance from the source. By appropriate calculations the concentration by weight has been converted into number of fibers by volume, the unit of measure currently used for the definition of asbestos pollution (4).

**Key words:** asbestos, sprayed asbestos, quantitative past exposure estimate, diffusion model, indoor premises, railway rolling stock.

### Introduzione

La determinazione dei livelli di inquinamento da polveri e di esposizione personale, dato il tipo di materiale e la lavorazione a cui viene sottoposto, viene usualmente effettuata mediante campionamenti personali o di area, solitamente localizzati nelle vicinanze della sorgente. In grandi ambienti di lavoro la diffusione delle polveri, dal luogo dove vengono prodotte al resto del locale, espone all'inalazione anche maestranze non operanti direttamente su materiali o macchine che producono il fattore di rischio sotto indagine. Molto spesso non si dispone di dati che consentano la valutazione dell'esposizione degli addetti sia diretti che indiretti, dato che in passato la pratica del monitoraggio ambientale era scarsamente diffusa nel nostro paese. L'assenza di questi dati rappresenta un handicap, in particolare negli studi epidemiologici occupazionali, dato che la valutazione e l'assegnazione dell'esposizione pregressa di lavoratori arruolati in una coorte è fortemente raccomandata (1). Si è pertanto valutata la possibilità, sotto alcune ipotesi di idealità, di calcolare le concentrazioni di inquinanti indoor utilizzando un modello diffusionale semplice (gaussiano) usualmente utilizzato per la stima delle concentrazioni di inquinanti in ambiente esterno.

Come già descritto sotto opportune condizioni di ventilazione del locale (velocità moderate, flussi bidirezionali di aria), architettura dell'ambiente indoor e condizioni di produzione dell'inquinante (dimensione della sorgente emittente molto minore dell'ambiente interno in cui l'inquinante si diffonde), l'equazione di bilancio massivo per il calcolo della concentrazione delle particelle indoor porta ad una espressione delle concentrazioni analoga a quella del modello gaussiano per ambienti outdoor (6). Nota la geometria del locale e le condizioni emissive della sorgente, le maggiori incertezze riguardano i coefficienti che tengono conto della dispersione dell'inquinante. Attraverso l'applicazione del modello si può ottenere una stima della distribuzione delle concentrazioni di inquinante in funzione della distanza X dalla sorgente e per varie quote Z; nota la distribuzione è possibile stimare anche la concentrazione media indoor.

## Materiali e metodi

La costruzione di questo modello si rende necessaria per procedere alla stima dell'esposizione pregressa a fibre di amianto aerodisperse in un ambiente confinato adibito alla coibentazione di carrozze ferroviarie nell'ambito di uno studio epidemiologico di coorte (10). All'epoca in cui erano in atto le lavorazioni non sono mai stati effettuati né monitoraggi ambientali, né valutazioni individuali dell'esposizione; di conseguenza non sono disponibili dati ambientali relativi alla concentrazione dell'inquinante nei locali di lavoro, utili a stimare la valutazione dell'esposizione personale. Erano note agli autori le tipologie delle sorgenti inquinanti (spruzzatura di amianto, rimozione delle sbuffature, rimozione degli sfridi) per le quali esistono in letteratura dati di misure effettuate in lavorazioni analoghe (2, 7, 9, 11). Le dimensioni ed il peso delle fibre di amianto che si aerodisperdono nei processi di lavoro consentono di stabilire che il trasporto dovuto alle correnti di aria, che si instaura inevitabilmente anche con il semplice movimento di persone al lavoro, prevalga rispetto alle fibre che si depositano sul pavimento per gravità (5). Questo giustifica l'utilizzo di modelli diffusionali sviluppati prevalentemente per inquinanti gassosi pur con i limiti di applicazione degli stessi e sviluppati, per quanto riguarda alcuni parametri caratteristici, per ambiente esterno (6).

Considerato che la sorgente inquinante nel caso in discussione può essere individuata nella carrozza ferroviaria, luogo in cui si svolgevano le operazioni a rischio, e che questa ha una dimensione molto inferiore a quella del capannone in cui avvenivano le lavorazioni di almeno due ordini di grandezza, è stato applicato il modello Gaussiano Plume, noto come modello Pasquill e Gifford, sviluppato per la stima delle concentrazioni di inquinanti outdoor conseguenti all'emissione prodotta da una sorgente puntiforme, approssimazione di un camino industriale (5, 8). La carrozza ferroviaria è stata schematizzata, sia come camino unico che racchiude tutto il potenziale emissivo, che con un numero di sorgenti (camini) pari al numero totale di finestrini, porte di accesso esterno alla carrozza e porte di interconnessione sulle testate. In questo secondo caso la concentrazione in ciascun punto della stanza è stata ottenuta come somma delle concentrazioni (sovrapposizione degli effetti) derivanti da ciascuna sorgente. Si è stimato che con la spruzzatura a regime, la concentrazione all'interno della carrozza fosse pari a 100 ff/cc (9).

### Il modello Pasquill e Gifford

L'equazione riportata di seguito esprime la concentrazione di inquinante in ambiente esterno in funzione della distanza sottovento per il caso di una emissione di inquinante stazionaria:

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi \cdot \sigma_y \cdot \sigma_z \cdot V} \cdot e^{-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}} \cdot \left[ e^{-\frac{(z-He)^2}{2\sigma_z^2}} + e^{-\frac{(z+He)^2}{2\sigma_z^2}} \right] \quad (1)$$

$Q$  = quantità di inquinante rilasciata [g/s]

$\sigma_y$  = coeff. di diffusione turbolenta lungo Y [m]

$\sigma_z$  = coeff. di diffusione turbolenta lungo z [m]

$V$  = velocità di trasporto [m/s]

$He$  = altezza della sorgente [m]

$x$  = distanza sottovento dalla sorgente nel piano orizzontale (m)

$y$  = distanza nel piano orizzontale nel piano orizzontale (m)

$z$  = quota verticale (m)

Pertanto l'equazione 1 è stata adattata al particolare ambiente di lavoro indoor.

Le dimensioni dell'ambiente di lavoro, molto maggiori rispetto alla sorgente inquinante, le condizioni microclimatiche ipotizzabili (velocità di trasporto molto minore di 2 m/s) hanno portato ad adottare in prima istanza i coefficienti di diffusione ricavati dalle formule per velocità minore di 2 m/s e nel caso di atmosfera stabile; per cui l'equazione 1 diventa:

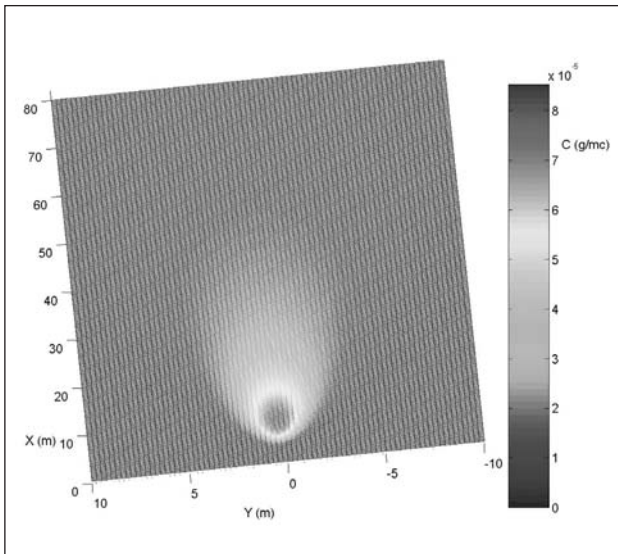
$$C(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi \cdot [A \cdot (1 + B \cdot x)^{-c}] \cdot [D \cdot (1 + F \cdot x)^{-c}] \cdot V} \cdot e^{-\frac{y^2}{2[A(1+Bx)^{-c}]}} \cdot \left[ e^{-\frac{(z-He)^2}{2[D(1+Fx)^{-c}]}} + e^{-\frac{(z+He)^2}{2[D(1+Fx)^{-c}]}} \right] \quad (1a)$$

## Risultati

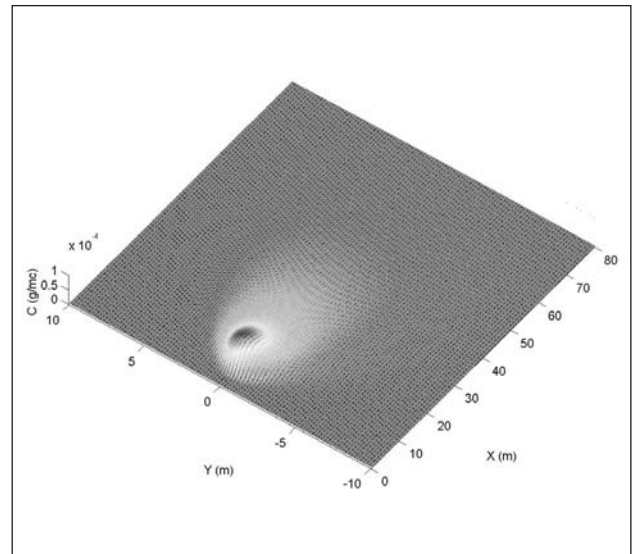
### Caso della carrozza ferroviaria schematizzata con un unico punto di emissione:

*Ipotesi di lavoro:*

1. la sorgente che racchiude tutta la potenzialità emissiva è cilindrica
2. La superficie totale emittente è pari alla somma di tutte le superfici dei finestrini, delle porte laterali e di quelle di interconnessione
3. l'altezza media di emissione ( $He$ ) pari a **2,6 m**
4. l'emissione totale di inquinante ( $Q$ ) che deriva dall'evento emissivo (spruzzatura all'interno) si svolge ad una velocità ( $u$ ) di **0.3 m/sec** derivante dalla movimentazione di mezzi e persone nonché dalla aerazione del locale, pertanto si assume che anche la velocità di trasporto ( $V$ ) sia di 0.3 m/sec
5. Il peso di una singola fibra pari a  $0,015 \times 10^{-9}$  grammi, assumendone dimensioni medie di  $8 \mu$  di lunghezza x  $0,4 \mu$  di diametro con densità pari a 3 (amianto di anfibolo)
6. la concentrazione di inquinante nella corrente di aria movimentata è quella fornita " $C_{media}$ " pari a 100 ff/cc.  $C_{media} = 0.0015 \text{ g/mc}$  1 fibra/cc =  $0.015 \times 10^{-3} \text{ g/mc}$
7. la concentrazione all'interno del cilindro è uniforme e pari a  $C_{media}$
8. l'emissione totale  $Q$  = pari a 0.010 g/s da ripartire sui 32 settori prevalenti della rosa delle direzioni del vento. Per ciascuna direzione si avrà una emissione pari a 0.0003 g/s.



**Figura 1. Valori di concentrazione per  $Y = 0$  m corrispondente al centro della carrozza per la sua lunghezza (Rappresentazione bidimensionale)**



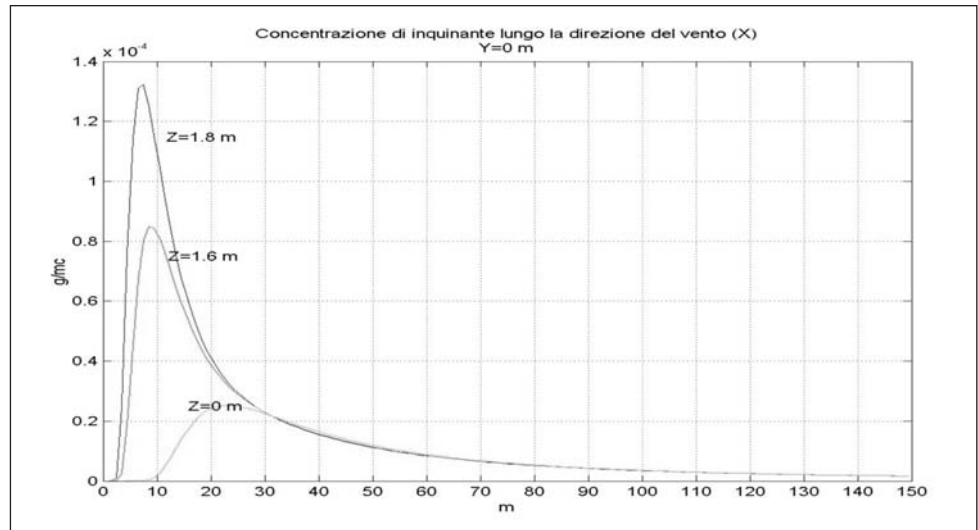
**Figura 2. Valori di concentrazione per  $Y = 0$  m corrispondente al centro della carrozza per la sua lunghezza (Rappresentazione tridimensionale)**

La quota a cui interessa calcolare la concentrazione, è quella a livello della zona di respirazione dell'uomo  $Z = 1.6$  m. I valori di concentrazione sono stati calcolati per un valore di  $Y = 0$  m che, come mostrano le figure 1 e 2, rappresenta il punto in cui si riscontra la massima concentrazione calcolata a parità di quota. In pratica  $Y = 0$  corrisponde al centro della carrozza per la sua lunghezza nel contempo  $X = 0$  corrisponde al centro della carrozza per la sua larghezza.

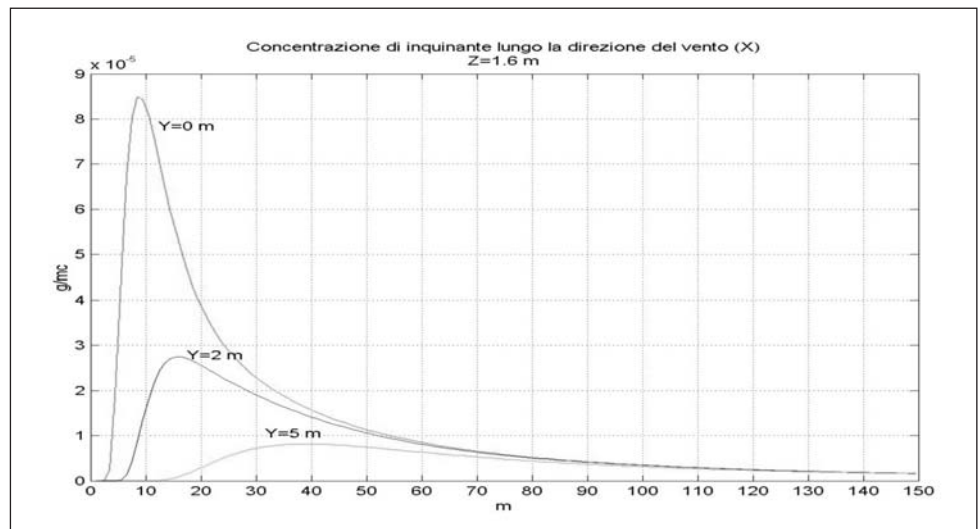
Il grafico 1 riporta i valori di concentrazione a distanza  $X$  dalla sorgente al variare di  $Z$  per  $Y=0$ .

Nel grafico 2 sono riportati i valori di concentrazione a distanza  $X$  dalla sorgente al variare di  $Y$  per  $Z$  pari a 1,60 mt.

Le figure 3 e 4 mostrano i risultati ottenuti della simulazione nel caso di un unico cammino considerando che il modello presuppone la stessa concentrazione indipendentemente dalla direzione del flusso di aria.



**Grafico 1. Variazione della concentrazione con  $Y = 0$  a quote diverse ( $Z$ ) ad una distanza  $X$  dalla sorgente emissiva**



**Grafico 2. Variazione della concentrazione a pari quota ( $Z = 1,6$ ) al variare di  $Y$**

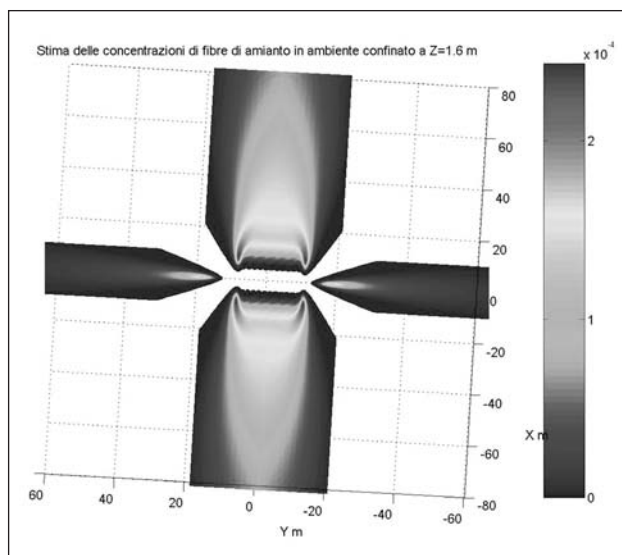


Figura 3

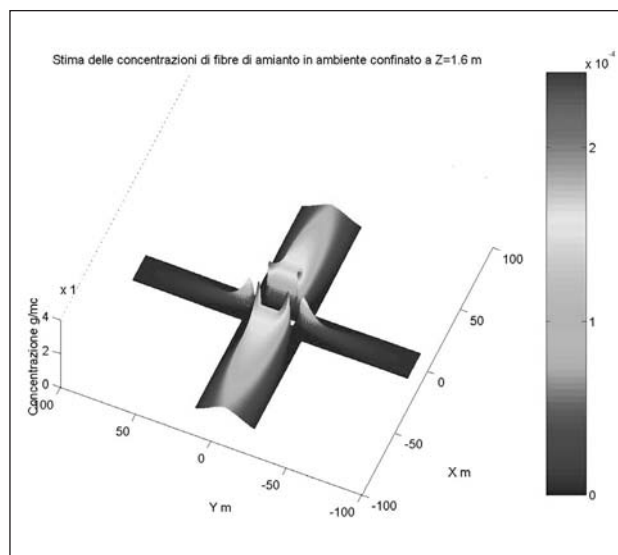


Figura 4

### Caso della carrozza ferroviaria schematizzata con un numero di sorgenti coincidenti con le porte ed i finestrini

Il modello è stato poi affinato schematizzando con maggiore dettaglio la carrozza ferroviaria.

L'emissione totale di 0.7 g/s è stata ripartita tra i finestrini, le porte di accesso alla carrozza e quelle di interconnessione. È stata considerata una carrozza ferroviaria con 13 finestrini per lato, 2 porte di accesso esterne per lato e 2 di interconnessione sulle testate. Nella Tabella III si riportano le dimensioni geometriche in metri relative a: carrozza, porte e finestrini.

Altri dati utilizzati nel calcolo sono i seguenti:

$lg = 2.8$  m; Larghezza carrozza orientata secondo l'asse X  
 $nf1 = 0$ ; Numero di finestrini per lato prima della prima porta

$pp = 2$ ; Numero di porte lato finestrini

$nf2 = 13$ ; Numero di finestrini per lato tra due porte;

$nf3 = 0$ ; Numero di finestrini per lato dopo la seconda porta;?

$Lf = 1.0$ ; m Lunghezza di un finestrino

$Ld = 0.6$ ; m Spazio tra due finestrini consecutivi m

$nf = nf1 + nf2 + nf3 + pp$ ; Totale sorgenti

$nd = nf - 1$ ; Numero di spazi per lato

$l = nf * Lf + nd * Ld + 2 * Ld + 1 \rightarrow 22.4$  m Lunghezza della carrozza

$S = 0.8\%$  sezione di un finestrino in mq

È opportuno precisare che i finestrini del tipo di carrozza utilizzata nel modello sono in totale 14. Due di questi sono a servizio delle Toilettes ed hanno una dimensione che è circa la metà dei finestrini per i passeggeri. La superficie totale è stata ottenuta dalla sommatoria della superficie di 13 finestrini.

In considerazione delle dimensioni delle aperture l'emissione più elevata è quella che avviene attraverso le porte:

1. si è assunto che valga sempre l'equazione 1 per valutare la concentrazione risultante in un punto dello spa-

zio dovuta a ciascuna emissione. La concentrazione totale in ciascun punto è stata calcolata considerando la sovrapposizione degli effetti, data la linearità della equazione rispetto alla emissione, e quindi come somma delle emissioni di ciascuna sorgente.

2. come altezza media di emissione dalle aperture si è assunta quella del centro dei finestrini pari a 2,80 m e quella del centro delle porte pari a 2.33 m, che coincidono con l'altezza rispetto al suolo del baricentro di ciascuna sorgente. Il punto inferiore delle ruote della carrozza è pari al piano del pavimento;
3. la quota Z è sempre quella di 1.6 m;
4. le figure 3 e 4 riportano i risultati della simulazione effettuata.

Si osserva che le concentrazioni massime di 0.00015 g/mc si hanno in prossimità delle porte di accesso, essendo emissioni più prossime alla quota Z, con valori massimi inferiori a 0.0003 g/mc in prossimità dei finestrini.

Il contenuto delle Tabelle I e II descrive in termini numerici l'obiettivo di questa simulazione. Si può notare che la concentrazione più elevata di fibre aerodisperse alla quota Z = 1,6 m si rileva tra i 7 e gli 11 metri di distanza dalla carrozza in fase di spruzzatura. A distanze ragguardevoli dalla sorgente (X = 40 m) il livello di inquinamento è ancora decisamente elevato, intorno ad 1 ff/cc. In tutto il capannone la concentrazione non è mai inferiore a circa 0,23 ff/cc.

### Discussione

La ricostruzione dell'esposizione progressa ad una qualsiasi sostanza che poteva in passato essere presente in ambienti di lavoro comporta sempre notevoli difficoltà ed in particolare quando le lavorazioni con possibile esposizione sono state dismesse da tempo e non sono disponibili risultati di indagini ambientali. Tuttavia, almeno nel caso dell'amianto è possibile far riferimento a stime di intensità ricavate da monitoraggi effettuati in condizioni

**Tabella I. Concentrazione di fibre aerodisperse nel capannone**

Concentrazione	fibre/cc	g/mc
C <sub>inq</sub> media	0.9	1.35x10 <sup>-5</sup>
C <sub>inq</sub> max	5.67	8.49x10 <sup>-5</sup>

**Tabella II. Concentrazione di fibre aerodisperse in funzione della distanza in metri dalla sorgente**

Distanza dalla sorgente (X = metri)	Concentrazione (ff/cc)
1	0
2	0
3	0,037
4	0,685
5	2,293
7	5,073
9	5,672
11	5,200
15	3,780
20	2,571
30	1,523
40	1,043
50	0,754
60	0,565
70	0,436
80	0,346
90	0,280
100	0,232

**Tabella III. Dimensioni in metri della carrozza**

Larghezza carrozza orientata secondo l'asse X	2.8
Lunghezza carrozza orientata secondo l'asse Y	22.4
Numero di finestrini per lato	13
Lunghezza di un finestrino	1.0
Spazio tra due finestrini consecutivi	0.6

analoghe a quelle di cui stiamo discutendo. È bene comunque precisare che “fare riferimento” non significa necessariamente mutuare tout court dati di contaminazione ambientale da una situazione all'altra. Spesso l'intensità della concentrazione di inquinanti non è automaticamente traducibile in esposizione per gli addetti, dato che quest'ultima è la sintesi di una serie di variabili che interagendo tra loro hanno la capacità di cambiarla enormemente variandone il livello, anche di più ordini di grandezza (2, 7, 11). È nota inoltre la capacità delle fibre di amianto aerodisperse di permanere a lungo sospese in aria comportandosi in modo quasi analogo a quello dei fumi e dei gas, ma diverso è l'effetto cui si assiste quando materiali friabili sono manipolati: vengono emesse fibre in aria e veri e propri ciuffi possono cadere a terra. Se non rimossi

**Tabella IV. Concentrazione di fibre aerodisperse indoor a distanza X da operazioni di spruzzatura (9)**

Distanza dalla sorgente (m)	Concentrazione (ff/cc)
3	70
4,5	17
6	37,6 - 66
10,5	10
22,5	46

prontamente le fibre possono essere risollevate dal movimento di persone, carrelli ecc. causando il cosiddetto “inquinamento secondario”, prolungando ed incrementando la presenza delle particelle aerodisperse (3). Nel caso che stiamo discutendo non erano disponibili risultati di monitoraggio ambientali effettuati durante gli anni di produzione di carrozze ferroviarie coibentate con amianto a spruzzo. Il presente lavoro ha l'obiettivo di stimare la contaminazione ambientale piuttosto che l'esposizione dei lavoratori. Quest'ultima verrà stimata in un passo successivo inserendo nell'algoritmo di calcolo le variabili che consentono il calcolo dell'esposizione ponderata nel tempo.

Il modello restituisce i risultati prendendo in considerazione soltanto una sorgente emissiva in quanto facilmente standardizzabile e trascura l'emissione verosimilmente causata dagli sfridi di lavorazione che cadevano per terra intorno alla carrozza durante la spruzzatura e le sue rifiniture. Il calpestio delle maestranze nonché il passaggio di carrelli elevatori potevano causare il cosiddetto “risollevamento” delle fibre in aria (3). Queste condizioni ambientali “oggettive” potevano causare con certezza un incremento della contaminazione ambientale, ma difficilmente stimabile da un punto di vista quantitativo.

Reitze et al (1972) descrive la contaminazione ambientale dovuta alla spruzzatura dell'amianto in ambiente confinato mediante misure effettuate ad una certa distanza dalla sorgente ed i risultati sono riportati nella Tabella IV.

Si può notare una certa variabilità ed un trend in diminuzione all'aumentare della distanza dalla sorgente che non ha un andamento lineare. L'autore giustifica questa variabilità con le correnti d'aria presenti nel locale sottoposto a spruzzatura. I risultati delle misure mostrano un livello più elevato di quello calcolato con il modello utilizzato. Questo è dovuto al fatto che la spruzzatura avviene in condizioni molto diverse. Benché entrambe effettuate in ambiente indoor, la spruzzatura alla quale è stato applicato il modello avviene all'interno della cassa dei rotabili che funge da parziale schermo verso l'ambiente generale, benché finestrini e porte siano aperte in quanto l'installazione è prevista durante l'allestimento, una fase successiva del ciclo di costruzione.

## Conclusioni

Il modello adottato sembra rispondere qualitativamente bene, rappresentando i livelli di concentrazione in modo appropriato e realistico. La scarsità di dati riguardanti i livelli

di concentrazione nell'ambiente di lavoro dove si effettuavano queste lavorazioni porta a concludere che il modello emissivo schematizzato necessita comunque di un approfondito processo di validazione e messa a punto utilizzando i pochi dati disponibili ad oggi, o in alternativa sarebbe opportuno riprodurre nuovi dati, pur essendo coscienti delle difficoltà a ricostruire, nella realtà attuale, livelli emissivi paragonabili, ripetendo procedure non più in uso.

I risultati ottenuti consentono comunque di affermare che anche l'esposizione cosiddetta "indiretta" cioè quella di coloro che lavorano nello stesso ambiente, ma non sono i diretti "produttori" dell'inquinamento, subiscono un'esposizione ad importanti livelli di fibre di amianto aerodisperse.

---

### Bibliografia

- 1) Burdorf A, Swuste P. An expert system for the evaluation of historical asbestos exposure as diagnostic criterion in asbestos-related diseases. *Ann Occup Hyg* 1999 Jan; 43(1): 57-66.
- 2) Casini S. Datamiant. Banca dati sulle concentrazioni di fibre di amianto in ambienti di lavoro. 05/06/2012.
- 3) Chiappino G, Sebastien P, Todaro A. Atmospheric asbestos pollution in the urban environment: Milan, Casale Monferrato, Brescia, Ancona, Bologna and Florence. *Med Lav*. 1991 Sep-Oct; 82(5): 424-38.
- 4) Decreto Ministeriale Sanità 06/09/1994.
- 5) Gifford F. A. Use of routine meteorological observations for estimating atmospheric dispersion. *Nuclear Safety* 1961; 2: 47-51.
- 6) Keil CB. A tiered approach to deterministic models for indoor exposure. *Appl Occup Environ Hyg* 2000 Jan; 15(1): 145-51.
- 7) NIOSH. Occupational Exposure to asbestos: criteria for a recommended standard. U.S.A 1972.
- 8) Pasquill F. The estimation of the dispersion of windborne material, *The Meteorological Magazine*, 1961 vol 90, No. 1063, pp 33-49.
- 9) Reitze WB, Nicholson WJ, Holaday DA, Selikoff IJ. Application of sprayed inorganic fibre containing asbestos: *Occupational Health Hazards. Am Ind Hyg Assoc J* 1972 Mar; 33(3): 178-91.
- 10) Seniori Costantini A, Innocenti A, Ciapini C, Silvestri S, Merler E. Mortality in employees of a railway rolling stock factory. *Med Lav* 2000 Jan-Feb; 91(1): 32-45.
- 11) Williams PR, Phelka AD, Paustenbach DJ. A review of historical exposures to asbestos among skilled craftsmen (1940-2006). *J Toxicol Environ Health B Crit Rev* 2007 Sep-Oct; 10(5): 319-77.

**Corrispondenza:** Stefano Silvestri, Istituto per lo Studio e la Prevenzione Oncologica, Via delle Oblate 2, 50141 Firenze, Italy, E-mail: s.silvestri@ispo.toscana.it