

## CONCETTI BASE

È necessario partire dal presupposto per cui rischio e pericolo sono due concetti diversi. Il pericolo è una proprietà intrinseca di un agente avente il potenziale di provocare un danno, mentre il rischio è la probabilità che questo si realizzi nelle reali condizioni di esposizione e di impiego. Se parliamo di effetti acuti è possibile rendere quantitativo il rischio calcolandolo come prodotto tra la probabilità che si verifichi e la magnitudo che ha. Per questo è importante il sistema di protezione e prevenzione, perché la protezione permette di abbassare il valore della magnitudo, mentre la prevenzione di ridurre la probabilità che l'evento si verifichi. Di fatto però la quantificazione del rischio è ad elevata soggettività. Ciò nonostante, possiamo sorvolare sul tema perché ci occupiamo di rischio cronico da agenti chimici, per cui la magnitudo è costante e si può solo modificare il valore del termine che indica la probabilità, quindi facendo prevenzione. Il motivo per cui risulta importante è dovuto alla necessità di prevenire le malattie professionali. I concetti necessari ad esaminare il caso sono:

- L'esposizione che è la reale concentrazione nel tempo di contatto tra l'inquinante e il soggetto
- La dose che è la concentrazione di inquinante nel tempo dispersa, per cui viene poi divisa tra interna, esterna e target a seconda del riferimento in questione.

Il problema che si pone a questo punto è quello di valutare l'esposizione affinché si verifichi che è la causa di una malattia professionale, così da fare prevenzione evitandone cioè l'insorgenza. Per farlo è necessario fare delle misure, così da poter poi confrontare i valori con i valori limite di esposizione professionale TLV. Gli agenti chimici verso i quali va posta l'attenzione sono i cancerogeni che si trovano in allegato 42 della 81/08 e per cui è obbligatoria la valutazione dei rischi con l'apertura del registro degli esposti e poi gli agenti pericolosi che sono quelli che non rientrano tra i cancerogeni ma che possono comportare un danno per la salute dei lavoratori per cui esiste, infatti, un valore limite di esposizione professionale.

Le norme a cui fare riferimento sono:

- La 482 del 1998 per i criteri generali di prestazione delle misure per gli agenti chimici
- La 689 del 2019 che invece offre le guide per la valutazione dell'esposizione degli inquinanti aerodispersi per inalazione.

Ci occupiamo di seguito dei rischi cronici di agenti chimici e fisici, l'entità del danno risiede nello scambio di energia tra l'ambiente e l'uomo.

Per fare valutazione del rischio da agenti chimici bisogna campionare gli inquinanti al fine di fare valutazione dell'esposizione. Il campionamento e le analisi sono validati in norma tecnica così da poter restituire risultati tra loro confrontabili e non opinabili oltre che non diversificati per la sola mano del campionatore. Esistono procedimenti a lettura diretta ma anche a lettura indiretta, in quest'ultimo caso anche per quanto riguarda il trasporto e la conservazione del provino. Bisogna sempre ricordarsi che la misura è di fatto una stima, per cui esisterà un certo grado di incertezza; è necessario tenere conto di alcuni fattori:

- Il LOQ cioè il limite di quantificabilità, il limite minimo per ottenere un risultato valido e quantificabile con un buon grado di precisione e accuratezza
- Il LOD cioè il limite di derivabilità nonché la quantità minima che può essere rilevata dallo strumento seppur non analiticamente quantificabile
- L'incertezza globale della misura cioè lo scostamento della media delle misure con il valore di riferimento

Gas e vapori possono essere campionati su supporti solidi e allora si parla di adsorbimento oppure su supporti liquidi per cui si parla di assorbimento.

Il risultato della misura può avvenire in campo e allora si parla di misure dirette oppure si preleva il campione che viene analizzato successivamente e si parla di misura indiretta.

---

## CAMPIONAMENTO PER ASSORBIMENTO

Viene fatto tramite degli strumenti che si chiamano gorgogliatori o assorbitori in cui il campione d'aria viene fatto fluire attraverso un liquido che fa da substrato di raccolta. Il passaggio dalla fase gas a quella liquida è dovuta all'instaurarsi di un equilibrio liquido-gas, disperdendo cioè l'aria nel liquido assorbente – il più idoneo all'inquinante in questione - sotto forma di bollicine.

I gorgogliatori sono dei contenitori in vetro o in plastica dotati di un tubicino in cui entra l'aria da campionare, che finisce con un setto poroso che è immerso in un liquido e determina la formazione delle bollicine. All'interno delle bolle si crea così un gradiente di concentrazione che determina la migrazione dell'inquinante dal centro della bolla all'interfaccia aria-liquido. L'assorbimento può essere di tipo fisico per cui c'è dissoluzione e formazione di una fase omogenea oppure chimico per cui reagisce e forma un composto. In ambo i casi è importante tarare lo strumento per le condizioni adatte di temperatura e pressione, assicurarsi di superare il LOQ, scegliere un liquido che non interferisca con il campionamento e accertarsi che la porosità del setto sia omogenea affinché non ci siano corsie preferenziali per le bolle oppure una eccessiva resistenza al passaggio dell'aria. Si parla in genere di una porosità con dei fori che non superano i 100 micron.

A questo proposito il meccanismo che si sfrutta è la legge di Henry (che vale per soluzioni diluite) che ci dice che la pressione parziale all'uscita del gorgogliatore è pari al prodotto tra la costante di Henry e la frazione molare di inquinante nel liquido.

Esistono diversi tipi di gorgogliatori, tra cui:

- Gorgogliatore con setto a forma di candela che ha il problema però di non sfruttare tutta l'altezza del liquido,
- Gorgogliatore con setto a piattello che invece garantisce una maggiore omogeneità di contatto tra tutte le bolle che vengono a formarsi oltre che sfruttare l'intera colonna di liquido,

- Gorgogliatore a cilindro rovesciato che consente di avere un maggior numero di bolle, interessa tutto il liquido, è più robusto e garantisce un maggior tempo di contatto.

Se prendiamo quest'ultimo possiamo chiederci quali sono i parametri da tenere in considerazione per campionare.

- Il tempo di contatto tra la bolla e il liquido può essere facilmente calcolato:  $t_c = \frac{S}{q_c} \Delta h$
- Il tempo di diffusione, il quale dipende dalla prima legge di Fick  $t_d = k * \frac{r^2}{D}$ , in genere i raggi dei pori dei setti porosi sono compresi tra gli 0,15 e i 100 micron, la costante k è 0,5 e D ha un valore medio di 0,1 per cui  $0,5 * \frac{0,15^2}{0,1} = 0,1$  secondi
- il tempo di campionamento dipende dal tempo di diffusione, cioè dal tempo di cui l'inquinante ha bisogno per poter passare nel liquido, affinché però una bollicina raggiunga l'1% di presenza di inquinante deve rinnovarlo sulla propria superficie 5 volte; a questo si aggiunge poi un ulteriore fattore cautelativo 3:  $t_{campionamento} = 3 * 5 * t_d = 15 t_d$  che per i calcoli di sopra vuol dire  $t_{campionamento} = 1,5$  secondi

A questo punto quello che devo chiedermi qual è la concentrazione ambientale che posso desumere quando analizzo poi la concentrazione presente nel liquido:  $C_{ambiente} = \frac{V_{liquido} * C_{liquido}}{q_c * t_c} > \frac{V_{liquido} * LOQ}{q_c * t_c}$  come limite inferiore e con un limite superiore dato dall'esaurimento del reagente o dal limite di saturazione fisico. Di fatto quello che succede è che a fronte di un certo numero di moli di inquinanti che entrano nel gorgogliatore e dal numero di quelle che escono si può calcolare il numero di moli che restano nel liquido, a queste però va imposto il limite della legge di Henry che mi dice che la pressione parziale dell'inquinante all'uscita del gorgogliatore deve essere in equilibrio con la concentrazione di inquinante che è invece nel liquido; è proprio la legge di Henry a limitare la possibilità di raggiungere il 100% dell'efficienza. Sotto l'ipotesi di soluzione diluita vale che il numero di moli campionate è  $n = \frac{A}{B} (1 - e^{-Bt})$  con  $A = \frac{q_c * p_0}{RT}$  e  $B = -\frac{H * q_c}{RTN}$  per cui quindi n tende ad  $\frac{A}{B}$  per  $t \rightarrow \infty$  cioè a regime stazionario. La percentuale di moli perse si chiama permeanza ed è  $\epsilon = 1 - rendimento = \frac{n_{out}}{n_{in}}$ . Se si sceglie la massima perdita di moli percentuali si ricava il tempo di campionamento necessario. Per ridurre la perdita di moli si può ridurre il tempo di campionamento, ma bisogna superare il LOQ per cui un altro modo per ovviare al problema è mettere in serie dei gorgogliatori così da ridurre il numero di moli perse. Data la concentrazione che si ritrova nel liquido del gorgogliatore, si può calcolare la concentrazione di inquinante contenuta in ambiente come:  $C_{ambiente} = \frac{V_l * C_{liquido}}{q_c * t_c * nu}$

Il bilancio di massa, a patto di conoscere la funzione generatrice dell'inquinante, mi permette poi di stimare la concentrazione in ambiente, se i risultati ottenuti sono confrontabili allora c'è ragione di pensare che il campionamento sia riuscito.

Si ricorda di prestare attenzione a P e T durante i campionamenti, perché potrebbero interferire stabilizzando ad esempio l'inquinante in fase gas.

## CAMPIONAMENTO PER ADSORBIMENTO

Ad oggi più utilizzato dell'assorbimento, l'aria viene fatta fluire su di un supporto solido che adsorbe l'inquinante; anche in questo caso pressione e temperatura giocano un ruolo determinante perché modificano la quantità di agente adsorbito per unità di massa di materiale adsorbente. Tra la fase gas e quella solida si instaura un equilibrio simile a quello dell'assorbimento e che, questa volta, può essere descritto con delle isoterme di adsorbimento che esprimono la relazione tra la pressione parziale dell'inquinante e la quantità massima che può essere adsorbita all'equilibrio. A questo proposito di diverse e per ognuna di queste ne esiste una specifica per ogni coppia di adsorbente e adsorbito. Bisogna ricordare che aumentando la temperatura la capacità di adsorbimento diminuisce.

La più semplice è l'isoterma di Henry che segue l'andamento  $x = kp$ , non vale però quasi mai se non per temperature molto basse.

C'è poi l'isoterma di Freundlich che segue l'andamento  $x = kp^{\frac{1}{n}}$ , questa non è adatta se l'inquinante ha un'alta pressione parziale in aria e cioè un'alta concentrazione perché non prevede il raggiungimento della saturazione dell'adsorbente.

La più idonea a descrivere il comportamento reale è invece l'isoterma di Langmuir che segue l'andamento  $x = \frac{k_1 k_2 p}{1 + k_2 p}$  dove le k dipendono appunto dalla coppia di elementi coinvolti; questa prevede un limite di saturazione dell'adsorbente. In questo caso esiste cioè una capacità massima di adsorbimento, ma il sistema deve essere abbastanza semplice e cioè devono valere 4 condizioni:

1. i siti devono essere tra di loro equivalenti
2. la soluzione deve essere diluita
3. adsorbimento è di tipo fisico reversibile
4. adsorbimento monostrato

Il campionamento avviene sulle delle fiale nel cui interno sono contenuti dei tamponcini, c'è una zona detta di campionamento e una zona detta di controllo (che può esserci e non esserci). Quello che è necessario è che il letto adsorbente sia in grado di captare l'inquinante, il fronte di adsorbimento che viene a crearsi presenterà una prima zona che è satura e che va poi a tendere a zero nel tratto di letto non utilizzato, non linearmente ma ad esse, una forma dovuta alla velocità dell'aria che attraversa la fiala e cioè alla portata di campionamento. La zona né satura né vuota viene chiamata zona di trasferimento di massa o MTZ ed è in questa che avviene il passaggio di stato da fase gassosa a fase solida. Se si verificano dei tratti temporali di campionamento in cui la pressione parziale di inquinante entrante è prossima allo zero si rischia il deadsorbimento dell'inquinante a cui segue cioè il suo trasferimento alla zona successiva, per cui varia cioè il fronte della MZT. Attenzione perché se si sfonda la fiala, si supera cioè anche il letto di controllo allora c'è perdita di informazione e si sottostimerà la concentrazione

presente in ambiente. Il letto di captazione è in genere di qualche tipo di carbone attivo, ma può anche essere fatto ad esempio di gel di silice. Alcune fiale sono riutilizzabili anche diverse volte.

La massa di inquinante che viene catturata è  $m = C * q_c * t_c$  prima dello sfondamento, cioè del momento in cui, saturato il letto, si inizia a perdere inquinante. La capacità di carico prima dello sfondamento è allora data da:  $\text{carico operativo} = \frac{m}{m_{\text{adsorbente}}}$ . Invece se si vuole calcolare quanta massa è stata adsorbita, la *Concentrazione nel letto*  $= \frac{L_{ES} * x_{\text{saturazione}} + L_{UB} * 0}{L_{ES} + L_{UB}} = \frac{L_{ES} * x_s}{L}$  dove LES è la lunghezza equivalente della sezione di equilibrio e LUB è la lunghezza non utilizzata del letto. La concentrazione di inquinante interna alla fiala rispetto alla portata e al tempo di campionamento è invece  $x = \frac{q_c t_c c_p}{A * L}$  mentre  $x_s = \frac{q_c t_s c_p}{A * L}$  allora si ottiene la lunghezza necessaria del letto non utilizzato affinché non ci sia sfondamento della fiala:  $\frac{L_{ES} * x_s}{L} = \frac{L_{ES} * \frac{q_c t_s c_p}{A * L}}{L} = \frac{q_c t_s c_p}{A * L}$  e con tutte le semplificazioni del caso  $L_{UB} = L \left( 1 - \left( \frac{t_c}{t_s} \right) \right)$ .

Una volta che ho campionato avrò il mio liquido all'interno della fiala, adsorbito sul substrato solido. Pertanto, per poterlo quantificare avrò bisogno di deadsorbirlo; il deadsorbimento può essere di tipo chimico o di tipo termico. Nel desorbimento chimico non tutto il materiale finirà in soluzione, per questo si calcola il recupero  $R = \frac{\text{massa di inquinante desorbito nel solvente}}{\text{massa di inquinante che era stato adsorbito nel substrato solido}}$ . C'è un equilibrio solido-liquido

$$\text{costante: } k = \frac{\text{concentrazione nel liquido}}{\text{concentrazione rimasta nel solido}} = \frac{\frac{\text{massa}_{\text{inquinante nel liquido}}}{\text{volume}_{\text{liquido}}}}{\frac{\text{massa}_{\text{nel solido all'inizio}} - \text{massa}_{\text{inquinante nel liquido}}}{\text{volume}_{\text{solido}}}}$$

Quello di cui ci si accorge è che per desorbimenti successivi il recupero aumenta.

$$\text{La concentrazione ambientale si può poi calcolare grazie alla R: } C_{\text{amb}} = \frac{C_{\text{liquido}} * V_{\text{liquido}}}{q_c * t_c} * \frac{1}{R}$$

Il deadsorbimento termico invece sfrutta la destabilizzazione del deadsorbimento ad alte temperature, seppur non esiste un limite teorico di temperatura per la procedura, questo esiste per la resistenza dei materiali in questione.

Attenzione all'adsorbimento competitivo, anche l'acqua è un problema.

#### CAMPIONATORI DIFFUSIONALI

Stiamo parlando questa volta di campionatori passivi, motivo per cui si dilatano i tempi di campionamento che possono arrivare a durare anche dei mesi. I campionatori diffusionali sfruttano il gradiente di concentrazione dell'inquinante come forza motrice, di fatto il flusso di molecole si interrompe solo quando la concentrazione di tutto lo spazio diventa uniforme cioè si arriva all'equilibrio stazionario.

Da una zona ad alta concentrazione ad una a bassa concentrazione si instaura un  $\frac{dm}{dt} = -DA \frac{dc}{dt}$ , cioè un flusso  $J_x = \frac{1}{A} \frac{dm}{dt} = -D \frac{dc}{dt}$  nonché la prima legge di Fick. Se poi prendiamo in esame un elementino dagli spigoli  $2dx$ ,  $2dy$  e  $2dz$ , possiamo scrivere il bilancio di massa se attraversato dal flusso per cui avremo:

$$\begin{aligned} IN &= 2dy * 2dz * \left( J_x - \frac{\partial J_x}{\partial x} dx \right) \\ OUT &= 2dy * 2dz * \left( J_x + \frac{\partial J_x}{\partial x} dx \right) \end{aligned}$$

$$ACC = IN - OUT = 4dydz \left( J_x - \frac{\partial J_x}{\partial x} dx \right) - 4dydz \left( J_x + \frac{\partial J_x}{\partial x} dx \right) = -8dydz \frac{\partial J_x}{\partial x} dx = -8 dx dy dz \frac{\partial J_x}{\partial x}$$

C'è un altro modo per scrivere la massa contenuta nell'elementino:  $ACC = V * \frac{dc}{dt} = 8dxdydz \frac{dc}{dt}$

Allora posso eguagliare:  $-8 dxdydz \frac{\partial J_x}{\partial x} = 8dxdydz \frac{dc}{dt} \rightarrow -\frac{\partial J_x}{\partial x} = \frac{dc}{dt}$ , dalla prima legge di Fick  $J_x = -D \frac{dc}{dt}$

Allora:  $-\frac{\partial J_x}{\partial x} = \frac{dc}{dt}$ ;  $\rightarrow \frac{dc}{dt} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2}$  che è la seconda legge di Fick.

Nei campionatori diffusionali l'inquinante da campionare viene fatto diffondere attraverso il setto che garantisce diffusione monodirezionale, per cui si parte da una concentrazione in 0 maggiore e si raggiunge la concentrazione in l minore. Dopo un sufficiente tempo si raggiunge la stazionarietà per cui

$\frac{dc}{dt} = 0 = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \rightarrow D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} = 0 \rightarrow \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} = 0$  integrando  $\frac{dc}{dx} = \text{costante}$ . Dall'integrazione da 0 a l ricavo la costante e poi reintegrando trovo che c è lineare in x cioè lineare nel setto.

Allora quello che si può fare è riscrivere il flusso secondo la legge di Fick e derivarne la concentrazione così da avere il flusso effettivo in funzione delle concentrazioni. Il flusso che si trova, però, è quello in aria in assenza di resistenze di qualsivoglia tipo; poiché così non è, è necessario aggiungere un fattore moltiplicativo alfa.

Moltiplicando per l'area il flusso si ottiene la portata di campionamento e se si moltiplica ancora per il tempo di campionamento si trova la massa di inquinante interna da cui desumere in definitiva la concentrazione ambientale dell'inquinante.  $C_{ambientale} = \frac{(m_{inquinante\ nel\ setto} * lunghezza)}{Dt_c A \alpha} = \frac{m_{inquinante\ nel\ setto}}{Dt_c} K$  dove K contiene tutte le informazioni date dal costruttore, nonché la resistenza, l'area, la lunghezza del setto del campionatore.

### CAMPIONAMENTO DEL PARTICOLATO

Per il particolato atmosferico non vanno bene i metodi finora visti per fare campionamento, questo perché le particelle solide e liquide non sono come i gas aerodispersi ma sono invece soggette ad alcune forze da tenere in considerazione. Intanto il moto di queste particelle dipenderà dalle caratteristiche della particella stessa ma anche da quelle del fluido in cui si muove.

Quando ci riferiamo alle caratteristiche del fluido ci occupiamo del suo libero cammino medio e della sua viscosità dinamica.

- Libero cammino medio =  $\lambda = \frac{\mu}{0.499} \sqrt{\frac{\pi}{8\rho P}}$  che in condizioni ambiente per  $T=25C$  e  $P=1atm$  risulta essere  $\lambda_0 = 0,0667\ \mu m$ , per differenti condizioni del fluido  $\lambda = \lambda_0 \frac{\mu}{\mu_0} \frac{P_0}{P} \left(\frac{T}{T_0}\right)^{\frac{1}{2}}$
- Viscosità dinamica =  $\mu$  è una funzione polinomiale della temperatura

Quando parliamo delle caratteristiche della particella, ci riferiamo invece alla sua densità media e dimensione caratteristica vale a dire il diametro aerodinamico  $d$  che è il diametro che la particella avrebbe se, mantenendo la velocità a cui cade, avesse densità  $\rho = \frac{1g}{cm^3}$  e fosse sferica.

È importante perché il campionamento del particolato atmosferico è un campionamento dimensionale, cioè basato sulla grandezza delle particelle, perché da questa dipende la capacità potenziale di depositarsi in un particolare tratto delle vie respiratorie. Le particelle più grandi sono quelle che fanno parte della massa delle particelle inalabili e si fermano nelle prime vie aeree, poi c'è la massa delle particelle toraciche che possono depositarsi entro le vie respiratorie polmonari e poi la massa delle particelle respirabili che sono invece in grado di raggiungere gli alveoli polmonari ed eventualmente anche di entrare nel torrente circolatorio. Parliamo comunque di particelle con un diametro non più grande di 100 micron.

La domanda da porsi è come si muovono queste particelle in un fluido: abbiamo la forza peso verso il basso, la spinta di Archimede nonché la forza di galleggiamento che è trascurabile perché la densità della particella è molto maggiore di quella dell'aria e poi la forza di attrito  $F = c_D * \frac{\rho}{2} * \frac{\pi d^2}{4} * (v - U)|v - U|$  dove  $v$  è la velocità della particella e  $U$  quella dell'aria, in pratica compare la velocità relativa mentre il  $c_D$  è variabile.

Il  $c_D$  è in relazione al regime di flusso, vuol dire che:

- $Re < 0.1$  → regime di Stokes →  $c_D = \frac{Re}{24}$
- $0.1 < Re < 10^3$  → regime di transizione →  $c_D = \text{variabile}$
- $10^3 < Re < 10^5$  → regime newtoniano o turbolento →  $c_D = 0,4$

Invece da  $\lambda$  dipende il moto di slip flow oppure di moto continuo e me lo dice il numero di Knudsen  $k_n = \frac{\lambda}{d_p}$

$\lambda \geq 10 d_p \rightarrow$  moto di slip flow perché le particelle sono in grado di urtare

$10 d_p \geq \lambda \geq 0,1 d_p \rightarrow$  moto di transizione perché le particelle sono vicine ma hanno dello spazio

$\lambda < 0,1 d_p \rightarrow$  fluido in moto continuo perché le particelle non hanno lo spazio per urtarsi

Nel caso di moto di slip flow o transizione siamo nelle condizioni in cui ho bisogno di un coefficiente correttivo nella formula dell'attrito e parliamo di smog, fumi e particelle fini; questo coefficiente è il fattore di Cunningham che si rileva empiricamente e va al denominatore della formula di F che diventa:

$$F = \frac{c_D}{C} * \frac{\rho}{2} * \frac{\pi d^2}{4} * (v - U)|v - U|$$

Per cui si può descrivere il moto tramite la seconda legge di Newton:

$$\begin{aligned} \sum F = F_{peso} - F = ma &= mg - \frac{c_D}{C} * \frac{\rho}{2} * \frac{\pi d^2}{4} * (v - U)|v - U| \\ &= \frac{4}{3} \pi \left(\frac{d}{2}\right)^3 \rho g - \frac{c_D}{C} * \frac{\rho}{2} * \frac{\pi d^2}{4} * (v - U)|v - U| \\ &= \frac{\pi d^3}{6} \rho g - \frac{c_D}{C} * \frac{\rho}{2} * \frac{\pi d^2}{4} * (v - U)|v - U| \end{aligned}$$

Se l'aria è calma allora siamo in regime di Stokes allora  $U = 0$  e  $c_D = \frac{24}{Re}$  con  $Re = \frac{(\rho v d_p)}{\mu} \rightarrow c_D = \frac{24\mu}{\rho v d_p}$

Da cui: 
$$\frac{\pi d_p^3}{6} \rho * \frac{dv}{dt} = \left( \frac{\pi d_p^3}{6} \rho * g \right) - \frac{c_D}{C} * \frac{\rho}{2} * \frac{\pi d_p^2}{4} * (v - U) |v - U|$$

Allora con le hp e la semplificazione sulla massa:  $\frac{dv}{dt} = g - \frac{18\mu v}{d_p^2 \rho C}$  raggruppando  $\frac{dv}{dt} = g - \frac{v}{\tau C}$  con  $\tau$  che è il tempo di rilassamento della particella cioè il tempo che impiega la particella per raggiungere la sua velocità limite.

Per tempi abbastanza lunghi si raggiunge la stazionarietà, vale a dire  $t \gg \tau$  cioè:

$$v_{\text{sedimentazione}} = \left( g - \frac{dv}{dt} \right) * \tau C = g\tau C$$

Quello detto finora vale per aria calma per cui il moto si sviluppa tutto lungo y e la particella tende a sedimentare.

Le cose cambiano se si è in regime di aria meno che di slip flow, per cui non troppo turbolento; questo perché durante il campionamento se anche l'aria è calma, affianco alle zone di cattura si generano dei flussi d'aria. Si possono scrivere le accelerazioni lungo le componenti verticale e orizzontale:

$$\frac{dv_x}{dt} = -\frac{v_x - U_x}{\tau C} \quad \frac{dv_y}{dt} = -\frac{v_y - U_y}{\tau C} + g$$

per cui se integro trovo le equazioni del moto e invece dopo un tempo abbastanza lungo si raggiunge la stazionarietà vale a dire  $t \gg \tau$  cioè:

$$v_{\text{sedimentazione}}^x = U_x \quad \text{e} \quad v_{\text{sedimentazione}}^y = g\tau C + U_y = g\tau C$$

Durante il campionamento quello che accade è che si genera un campo di moto in grado di aspirare le particelle, l'aspirazione ha poi un sistema di filtraggio dimensionale. La velocità di cattura alla bocca del filtro è massima e va diminuendo esponenzialmente se ci si allontana. La velocità con cui le particelle vengono catturate e impattano sul filtro è detta *velocità di cattura*  $= \frac{q_c}{\pi r^2} = \frac{q_c * 4}{\pi d_p^2}$  mentre la funzione in x è  $v_x = \frac{q_c}{4\pi x^2}$ .

Diverso è il moto che si registra per le fibre che hanno una dimensione più allungata, proprio poiché il movimento dipende dalla forma. A questo proposito la grandezza caratteristica di una fibra è il rapporto di elongazione  $\beta = \frac{\text{lunghezza della fibra}}{\text{diametro della fibra}}$ . La velocità di sedimentazione di una fibra dipende dal suo orientamento in caduta e in realtà anche per le fibre è possibile definire il diametro aerodinamico tramite delle formule empiriche che dipendono dalle caratteristiche del materiale. Il motivo per cui è necessario servirsi di dei parametri è quello di capire quanto vale la resistenza dell'aria.

Quello che è utile nel campionamento del particolato è sicuramente l'utilizzo degli impattori multistadio per cui ad una membrana corrisponde una dimensione precisa.

## VALUTAZIONE DELL'ESPOSIZIONE CUTANEA

L'esposizione agli agenti di rischio può avvenire per diverse vie: inalatoria, per ingestione e cutanea; ci occupiamo di quest'ultima. Per esposizione cutanea si intende il processo interattivo tra una o più agenti contaminanti e la superficie della pelle. Va studiata perché è un fattore dell'esposizione e può contribuirvi in maniera consistente. Per definizione l'esposizione cutanea è la quantità di sostanza chimica in contatto con lo strato esterno della pelle, disponibile per l'assorbimento.

Il problema risiede nel fatto che è molto difficile calcolare l'esposizione per via cutanea perché non ci sono procedure standardizzate e validate, anche se esistono dei valori limite DOEL e di recente sono anche comparsi i TLV SKIN.

Ulteriori problemi derivano dalla significativa incidenza nell'analisi del singolo individuo e del comportamento della zona cutanea in questione. Esistono però diversi modelli che rappresentano il cammino del contaminante per via cutanea, come il modello cutaneo di Schneider, dove sono presenti una sorgente emissiva, l'ambiente esterno, l'ambiente personale e la delimitazione dell'abbigliamento, sotto il quale c'è la pelle. Nell'ambiente esterno e tra i vari componenti avvengono fenomeni di dispersione del contaminante, di rimozione, di emissione, di contaminazione, può esserci risospensione così come trasferimento o penetrazione attraverso l'abbigliamento. Sono coinvolte quindi le superfici al pari dell'interno e dell'esterno dei vestiti, i passaggi di fase, eventuali schizzi e l'immersione.

Il processo che porta all'esposizione segue l'iter per cui la sostanza raggiunge la pelle depositandosi, si crea allora un gradiente di concentrazione che fa da forza motrice in un processo di trasporto alla fine del quale c'è assorbimento.

L'assorbimento cutaneo dipende da molti fattori, in primis dalle caratteristiche fisiologiche della pelle e poi dalle caratteristiche dell'inquinante come il PH e la polarità.

Quello che si osserva è che scarsamente le molecole grandi vengono assorbite, invece, il coefficiente di permeabilità sale nel caso di soluzioni acquose ma anche in altri solventi cioè le sostanze che penetrano meglio la barriera cutanea sono quelle solubili nei lipidi e anche in acqua, mentre l'assorbimento da parte della pelle dei vapori è minimo se non del tutto trascurabile rispetto alla via inalatoria.

Le tecniche di misura delle esposizioni, seppur in genere inappropriate, presentano dei limiti e non sono standardizzate e validate – il che ne rende i risultati inconfondibili tra loro – esistono con il pregio di riuscire a differenziare la via di esposizione, la zona di campionamento, siano utili per verificare i DPI hanno però il difetto strutturale di non essere sempre in grado di stabilizzare l'inquinante sul substrato di raccolta, di non essere altamente rappresentativi e creano interferenza con la vita lavorativa. Possiamo dividerli in tre categorie:

- Tecniche per intercettazione  
Di base si utilizzano dei surrogati cutanei per captare l'inquinante su dei substrati che devono comportarsi come la cute. Si usano i cosiddetti PADS che devono essere scelti a seconda dell'inquinante e possono essere collocati sia sulla pelle che sui vestiti o su entrambi nel caso di utilizzo di barriere permettendo così di eseguire un confronto.  
Un'alternativa ai pads sono degli indumenti che si indossano durante il turno di lavoro e possono poi essere sezionati per analizzarli, costano naturalmente di più.  
Il vantaggio è che sono molto facili da usare, ma dopo il campionamento è bene maneggiare sia i pads che gli indumenti con cura.
- Tecniche per rimozione  
Bisogna applicare cioè una forza esterna che sia maggiore di quella di adesione alla cute, il rischio è quello di sottostimare il rischio a causa di una perdita del campione perché non si è raccolto tutto l'inquinante che era stato interessato al campionamento; il vantaggio è che sono tecniche molto semplici da utilizzare e che costano poco.  
Si può usare il lavaggio per strofinamento o per rimozione meccanica, si recupera poi dal liquido l'inquinante e la massa trovata è indicativa dell'esposizione.  
Si può procedere per strofinamento usando un mezzo di raccolta umettato e facendo però attenzione a non incorrere in gravi irritazioni.  
Si può procedere per asportazione a strappo con adesivo, ma bisogna stare attenti che la capacità di rimozione sia sufficientemente alta.
- Metodi di misura in loco  
Si misura cioè la sostanza tal quale: la tecnica si basa sulla capacità della sostanza di emettere luce visibile se illuminata con radiazione ultravioletta, naturalmente questo la rende una tecnica adatta alle sole sostanze naturalmente fluorescenti che non sono molte, ma in alcuni casi è possibile aggiungere un tracciante. La tecnica è però costosa, ma può servire per formare gli operatori o per decidere le zone in cui mettere dei pads. La tecnologia si è molto evoluta dagli anni '80.

#### CRITERI DI PROGETTAZIONE E RISTRUTTURAZIONE DI AMBIENTI INDUSTRIALI

L'azienda è obbligata a programmare interventi di miglioramento così come lo sono i progettisti nell'utilizzare i principi di sicurezza nella definizione del progetto. Fare l'analisi dei rischi serve a definire il quadro generale in cui inserire gli interventi e i programmi aziendali. È fondamentale tenere conto delle priorità, delle connessioni interne all'azienda e dei vincoli; quello che serve è una logica incrementale in termini di sicurezza così che le prime misure prese siano la base per le successive.

Per questo bisogna prima di tutto fare un elenco di tutti i rischi presenti, così da individuare le priorità di cui occuparsi. Per ogni rischio si scrivono gli interventi classificandoli: prima di tutto l'intervento che eliminerebbe o ridurrebbe significativamente il rischio, poi quelli che limitano il contatto con il pericolo facendo cioè prevenzione collettiva e solo in ultimo grado gli interventi che si occupano della protezione individuale; è evidente che sono messi in ordine di grado di sicurezza: gli ultimi sono i meno efficaci seppur spesso i più facili ed economici.

Prima di attuare un intervento deve essere stato progettato l'intero piano di intervento con note e giudizi su efficacia e fattibilità, contestualmente allo studio di fattibilità.

I DISPOSITIVI DI PROTEZIONE INDIVIDUALE, anche detti DPI, fanno parte della gerarchia più bassa di intervento per la salute e per la sicurezza, ma sono i più facili ed economici da impiegare negli ambienti di lavoro. Quando ci si riferisce ai DPI si intendono tutti quei dispositivi che proteggono il lavoratore da uno o più rischi per la salute e la sicurezza, non rientrano quindi le uniformi e gli abiti da lavoro. Tutti i dpi devono essere a loro modo certificati.

Sicuramente tutti questi dispositivi devono soddisfare alcuni requisiti:

- requisiti dei materiali tali da renderli efficaci contro l'agente di rischio ma confortevoli e adatti al contatto con la pelle
- requisiti funzionali nel senso che devono neutralizzare il rischio per i quali sono stati progettati, non causare impedimento all'attività lavorativa e devono essere ben tollerati da chi li indossa, cioè non fastidiosi, devono essere resistenti ed economici
- requisiti dei manufatti cioè adattabili alla persona, comodi da indossare e sfilare, senza parti pericolose, resistenti agli agenti specifici e con design e comfort tali da renderli gradevoli all'operatore.

La marcatura CE assicura gli standard di qualità europei, ma non tutte le marcature sono uguali:

- prima categoria  
che non è una vera categoria, si ottiene una dichiarazione di conformità che viene attestata in fase di costruzione del modello e di stesura della documentazione tecnica. Il fabbricante ha però l'obbligo di rilasciare la nota informativa nonché le istruzioni per l'uso e rientrano in questa categoria i DPI per danni fisici di lieve entità come i guanti da utilizzare sotto i 50°C oppure gli occhiali protettivi;
- seconda categoria  
in questo caso il costruttore deve scegliere un organismo notificato che si occupa di rilasciare la certificazione ma non prima di aver analizzato la documentazione e fatto una verifica di un numero sufficiente di esemplari, viene esaminata anche la nota informativa. La domanda di certificazione può essere fatta ad un solo ente una sola volta e in caso di esito negativo verranno avvisati tutti gli altri enti così che non sia possibile ricertificarla. Per tutta la durata della commercializzazione successiva alla certificazione non viene fatto alcun controllo;
- terza categoria  
oltre all'iter seguito dai dpi in seconda categoria, qui c'è un passaggio ulteriore che consente poi l'attribuzione della garanzia di qualità. Alla certificazione si aggiunge quindi il controllo del prodotto finito e il controllo del sistema qualità, ogni anno una volta fino

alla fine della commercializzazione del prodotto. Ci riferiamo qui ai guanti protettivi usati a temperature maggiori di 100°C o a temperature minori di -50°C, ai DPI per tensioni elettriche pericolose o per altri agenti di rischio di entità significativa.

Bisogna specificare che l'appartenenza ad una categoria piuttosto che un'altra non ha nulla a che fare con una gerarchizzazione dei dispositivi.

I dispositivi di protezione su cui vale la pena concentrare l'attenzione sono quelli per le mani e per le vie respiratorie.

La protezione delle mani necessita di guanti adatti al tipo di rischio, sia esso meccanico, chimico o biologico, termico, elettrico o da radiazioni; i fattori che contribuiscono alla scelta del guanto sono sicuramente il tipo di utilizzo che se ne fa e il tipo di protezione che deve fornire, quest'ultimo è indicato su ogni dispositivo tramite pittogramma come indicato da norma tecnica. I guanti per il rischio chimico hanno il loro pittogramma apposito e sono regolamentati dalla UNI EN 374 che ne specifica i requisiti. Le specifiche riguardano la permeazione, la penetrazione e la degradazione cioè l'alterazione delle caratteristiche chimico fisiche del materiale se a contatto con un prodotto chimico. Per penetrazione si intende invece il livello prestazionale al passaggio della sostanza chimica attraverso la porosità del materiale; per ogni livello si associa un minutaggio, a partire dal primo che equivale a 30 minuti fino al 4 che ne garantisce 180. La permeazione invece caratterizza la capacità del prodotto chimico di passare dalla parte esterna alla parte interna del guanto, vale a dire essere adsorbito, trasportato e desorbito nella superficie interna del guanto. Il livello di prestazione prevede per il primo un tempo di permeazione non superiore ai 10 minuti, al secondo non superiore di 30 e al terzo di 60; affinché un guanto possa essere classificato come resistente agli agenti chimici deve essere almeno di livello 2 e per almeno 3 sostanze che verranno poi indicate. Si noti che il livello 2 assicura un tempo di permeazione superiore ai 30 minuti ma entro i 60. Le aziende produttrici forniscono delle tabelle comparative per una serie di inquinanti indicando con il verde gli agenti per cui sono adatti, con il giallo quelli per cui è fondamentale prestare attenzione alla nota informativa e all'utilizzo e in rosso quelli per cui non è indicato l'utilizzo. Vengono poi indicati il tempo di permeazione e quello di degradazione come IP e ID.

La protezione delle vie respiratorie viene invece garantito da dei dispositivi che possono essere isolati o a filtro a seconda delle necessità. Valutati i rischi presenti, le condizioni ambientali, il tipo di attività e le esigenze dell'operatore sarà allora possibile scegliere il dispositivo più adatto, che per quanto correttamente selezionato necessiterà di un uso corretto per proteggere il lavoratore.

I dispositivi più comuni sono quelli a filtro, quelli per polveri-fibre-fumi-nebbie sono i dispositivi a filtro antipolvere mentre per gas-vapori ho bisogno dei dispositivi antigas che sono normati dalla UNI EN 141, sono realizzati in genere in carbone attivo capace di trattenere specifiche famiglie di composti chimici per assorbimento fisico o chimico; le classi alta, media o bassa del filtro non inficiano sull'efficienza filtrante bensì sulla capacità assorbente del filtro. I dispositivi di protezione individuale a filtro antipolvere, adatti quindi a polveri, fibre, fumi e nebbie sono quelli che sfruttano meccanismi di impatto, di intercettazione, di forze elettrostatiche e diffusive. Esistono i filtranti antipolvere divisi per efficienza dal FFP1 con il 78% al FFP3 con il 98%, le maschere in gomma che possono essere a semimaschera o a pieno facciale e poi sono divise in classi: SL per gli aerosol solidi e le nebbie a base acquosa e S per le nebbie a base organica. Legato all'efficienza filtrante del filtro c'è il fattore di protezione nominale, cioè la capacità del filtro di trattenere particelle  $FPN = \frac{C_{\text{inquinante in ambiente}}}{C_{\text{inquinante nel filtro}}}$  che mi dà un'indicazione di qual è la concentrazione massima a cui posso espormi. Un  $FPN=4$  mi consente di espormi a concentrazioni ambientali pari a 4 volte il TLV e sono i filtri P1, 10 volte per i P2 e 50 volte per i P3. Esistono poi anche i respiratori antipolvere assistiti che hanno in genere un elettroventilatore che invia aria ad una maschera eventualmente munita di filtro ed è definita la classe di ventilazione forzata e quella assistita.

Per quanto riguarda invece i dispositivi isolanti, sono necessari in caso di esposizione a concentrazioni di ossigeno in ambiente inferiore al 18% oppure se la soglia olfattiva con dpi a filtro è comunque superiore del tlv, ma anche se non conosco la natura dell'inquinante o la sua concentrazione in ambiente è eccessiva. Gli autorespiratori possono essere a circuito aperto ed eventualmente a pressione negativa o positiva, ma comunque dotati di bombola a circa 200 bar con zainetto di supporto e in grado di espellere l'aria dopo la respirazione oppure possono essere a circuito aperto, vale a dire che non rimpiazzano l'aria dopo la respirazione, bensì la depurano dalla  $CO_2$  e la arricchiscono di ossigeno prima di riproporla.

## VENTILAZIONE DEGLI AMBIENTI

Un sistema di ventilazione industriale è un sistema che permette di prevenire l'ingresso dei contaminanti nel circolo dell'aria degli ambienti di lavoro. A seconda della sorgente scelgo il tipo di sistema di ventilazione; in linea di massima possiamo dire che le sorgenti fuggitive, cioè delocalizzate, dislocate e numerose in vari punti dello spazio e allora serve la ventilazione generale che permette di rimpiazzare tutta l'aria, ma è assolutamente sconsigliata nel caso di sostanze tossiche che altrimenti andrebbero in giro, risulta però molto utile per controllare i livelli di umidità e temperatura oltre che l'odore. Alternativamente le sorgenti possono essere puntiformi, vale a dire localizzate con precisione, allora il metodo più adatto di ventilazione è quella di tipo locale; che è in linea di massima sempre preferibile a quella generale.

Una definizione assolutamente necessaria è quella di cappa che, nella ventilazione industriale, intende il sistema attraverso il quale l'aria inquinata è aspirata.

### - Ventilazione generale

L'idea principale su cui si basa è quella di estrarre aria dall'intero ambiente e rimpiazzarla con aria pulita. La trattazione si semplifica notevolmente se ipotizziamo un modello di miscelazione perfetta dell'aria, questo ci consente di inquadrare la situazione di un ambiente in termini di concentrazione passando da una funzione spazio temporale  $c(x,y,z,t)$  ad una solo temporale  $c(t)$ .

L'approssimazione è naturalmente ad un caso ideale, ma in questo caso non mi interessa in alcun modo la posizione della sorgente e come disperde e posso cioè ignorare il campo di velocità dell'aria.

L'assunzione di concentrazione uniforme nello spazio ci porta alla formulazione di un macromodello, un modello a parametri

concentrati in quanto il volume di controllo cioè la stanza è molto maggiore del volume differenziale ed è possibile fare un bilancio di massa:  $[ACC]=[IN]-[OUT]+[GEN]$  dove:

$$ACC = \frac{\Delta m_{inquinante}}{\Delta t} = \frac{\Delta(VC_{inq})}{\Delta t} = V \frac{\Delta C_{inq}}{\Delta t}$$

$$IN = C_{inq}^{in} Q_{aria}^{in}$$

$$OUT = C_{inq}^{out} Q_{aria}^{out}$$

$$GEN = G_{inq}$$

Le condizioni stazionarie impongono che l'accumulo debba essere nullo e possiamo anche assumere per semplicità che l'aria in ingresso sia pulita, per cui:

$$\begin{aligned} ACC = V \frac{\Delta C_{inq}}{\Delta t} = 0 &= IN - OUT + GEN \\ &= C_{inq}^{in} Q_{aria}^{in} - C_{inq}^{out} Q_{aria}^{out} + G_{inq} \\ &= 0 - C_{inq}^{out} Q_{aria}^{out} + G_{inq} \\ &= -C_{inq}^{out} Q_{aria}^{out} + G_{inq} \rightarrow C_{inq}^{out} = \frac{G_{inq}}{Q_{aria}^{out}} \end{aligned}$$

Naturalmente in linea generale, cioè se l'aria in ingresso è anch'essa contaminata, allora:

$$C_{inq}^{out} = \frac{C_{inq}^{in} Q_{aria}^{in} + G_{inq}}{Q_{aria}^{out}} \text{ dove in genere } Q_{aria}^{in} = Q_{aria}^{out} = Q \text{ e allora in sintesi } C_{inq}^{out} = \frac{C_{inq}^{in} Q + G_{inq}}{Q}$$

Questo è però quello che accade in un sistema ideale dove c'è miscelazione perfetta e dunque la concentrazione non varia né nello spazio né nel tempo. Cioè senza gradienti di concentrazione.

Se queste condizioni non sono rispettate, inevitabilmente il modello si complica per poter riprodurre la complessità del nuovo sistema non stazionario.

$$\begin{aligned} \text{NON STAZIONARIO} \Leftrightarrow \frac{dm_{inq}}{dt} &= \frac{d(VC_{inq})}{dt} = V \frac{dC_{inq}}{dt} = Q_{in} C_{in} - Q_{out} C_{out} + G_{inq} \\ \frac{dC_{inq}}{dt} &= \frac{1}{V} (Q_{in} C_{in} - Q_{out} C_{out}(t) + G_{inq}) \\ \frac{dC_{inq}}{dt} &= \frac{Q_{in} C_{in} + G_{inq}}{V} - \frac{Q_{out}}{V} C_{out}(t) \\ \frac{dC_{inq}}{dt} &= A + B * C_{out}(t) \end{aligned}$$

Se integriamo la funzione tra  $C(t)$  e  $C(0)$  da una parte e  $t=t$  e  $t=0$  dall'altra, quello che troviamo è che  $\frac{A+BC(t)}{A+BC(0)} = e^{Bt}$  che per  $t \rightarrow \infty$

implica stazionarietà e cioè  $C_{SS} = -\frac{A}{B} = -\frac{Q_{in} C_{in} + G_{inq}}{\frac{Q_{out}}{V}} = \frac{Q C_{in} + G_{inq}}{Q}$  come sopra. Il tempo in cui si passa al regime stazionario è 5 volte il tempo caratteristico del sistema  $T = 5 * t_{car}$  con  $t_{car} = -\frac{1}{B}$ .

Esistono dei sistemi di ricircolazione dell'aria, cioè tali per cui in ingresso ho un po' di aria nuova e un po' d'aria che dall'uscita è passata al depuratore che ha filtrato l'aria di scarico. Quello che è rilevante è che ci sia dell'aria di ricircolo,  $f = \frac{Q_{riciclo}}{Q}$  è la frazione di ricircolo, dove  $Q$  è l'aria aspirata dalla stanza e contaminata per un fattore di concentrazione  $C$ . Un dato importante di questi sistemi è il rendimento del depuratore  $\eta_{depuratore} = 1 - \varepsilon = 1 - \frac{\text{concentrazione all'uscita del depuratore}}{\text{concentrazione all'ingresso del depuratore}}$  con  $\varepsilon$  detta permeanza.

È fondamentale che se per un qualsiasi motivo il depuratore è fuori servizio, cioè  $\varepsilon = 1$  è comunque fondamentale che la concentrazione non superi il TLV, è cioè fondamentale che, poiché:

$C_{amb} = \frac{G}{Q(1-f)} < TLV$  allora  $f < 1 - \frac{G}{TLV * Q}$  cioè questa è la massima frazione di ricircolo che si può lasciare al depuratore così da garantire che, anche se dovesse andare fuori servizio, non si verifichino problemi di alcun tipo.

Diverso si presenta il caso in cui la concentrazione è diversa a seconda dello spazio e del tempo, cioè se non c'è miscelazione perfetta e si parla di miscelazione parziale. In questo caso la soluzione migliore da adottare, ma anche la più complessa, è quella di descrivere il campo di moto e di risolvere i bilanci con equazioni alle derivate parziali, passando così al problema di fluidodinamica

computazionale. Un'alternativa più semplice, invece, può essere quella di introdurre il fattore di miscelazione  $m \frac{dm}{dt} = \frac{d(VC)}{dt} = V \frac{dC}{dt} = G - mQ(1-f\varepsilon)C$  per cui se si integra e si risolve si trova:

$$\begin{aligned} C_{SS} &= \frac{G}{mQ(1-f\varepsilon)} \\ m &= \frac{C_{SS} - C_{esterna}}{C_{SS} - C_{esterna}} = E_r = \text{efficienza relativa globale} \end{aligned}$$

L'efficienza relativa globale è la misura dello scostamento dal caso di perfetta miscelazione, se è pari a 1 indica un modello a buona miscelazione e una concentrazione uniforme nello spazio, se è minore di 1 implica invece una miscelazione non uniforme e variazioni delle concentrazioni nello spazio.

L'idea negli spazi complessi in cui la miscelazione è parziale è che si possa definire un campo vicino alla sorgente e un campo lontano, delimitandoli da un muro virtuale che separa il volume miscelato da quello non miscelato, cioè quello lontano da quello vicino.

Esistono a tal proposito diversi tipi di ventilazione:

Ventilazione a pistone così chiamata perché l'aria in ingresso, pulita, spinge quella inquinata verso il basso orientandola verso il condotto di estrazione. L'efficienza relativa globale è pari a 2.

Ventilazione a miscelazione o a diluizione che è in genere il metodo più usato per riscaldare o raffreddare, si immette nella stanza aria pulita al fine di diluire la concentrazione di inquinante nella stanza. L'aria pulita è introdotta dall'alto mentre l'estrazione avviene dal basso. Quello a cui bisogna prestare attenzione è che non si creino zone di stagnamento. L'efficienza relativa globale è minore di 1.

Ventilazione a spostamento in cui si preleva aria pulita dall'esterno introducendola all'altezza del pavimento della stanza, si genera così l'estrazione dell'aria inquinata perché l'aria fredda e pulita si posiziona sotto mentre quella calda e inquinata sale. L'efficienza relativa globale è compresa tra 1 e 2.

Ventilazione a estrazione localizzata è quella che di fatto unisce la ventilazione globale e quella locale, mirando a catturare l'inquinante direttamente alla sorgente prima che possa disperdersi in ambiente mediante cappa, al contorno del quale si genera perciò un aumento di concentrazione. Si usa sempre se le sorgenti sono localizzate e l'efficienza relativa globale è maggiore di 2.

**Ventilazione locale**

Si tratta di rimuovere gli inquinanti tramite cappa nel loro punto di emissione, la cappa ha il compito di creare un campo di velocità dell'aria tale che catturi l'inquinante e lo porti al suo interno. Le caratteristiche di una cappa devono però essere scelte a seconda della sorgente che si sta gestendo. Le sorgenti possono emettere a bassa velocità senza la formazione di pennacchi ma con diffusione omogenea in tutte le direzioni se la densità dell'inquinante è circa uguale a quella dell'aria, può emettere a bassa velocità ma con la creazione di pennacchi galleggianti oppure anche ad alta velocità con una marcata direzionalità diffusiva. La geometria della sorgente può poi essere puntuale o lineare cioè con una misura che prevale rispetto alle altre, comunque dalla geometria della sorgente dipende la geometria della cappa che può essere chiusa, cioè che racchiude interamente o in parte il punto di generazione dell'inquinante, se ben progettata non c'è alcuna dispersione in ambiente oppure anche aperta.

Va prestata attenzione agli interferenti all'aspirazione delle cappe, vale a dire tutte le possibili correnti di aria calda, il movimento di macchine, operai e materiali o anche aperture che provocano correnti d'aria. Attenzione va fatta anche all'interposizione possibile dell'operatore tra la sorgente emissiva e la cappa, poiché può venire così meno l'efficienza, motivo per cui il luogo di posizionamento delle cappe è di notevole importanza.

Bisogna affrontare il tema di come si muovono le particelle nelle zone di aspirazione:

$v_{frontale} = \frac{\text{portata di aspirazione}}{\text{superficie dell'apertura}}$  vale a dire che se la cappa è sferica  $v_f = \frac{Q}{4\pi x^2}$  mentre se è lineare  $v_f = \frac{Q}{2\pi x l}$  cioè in funzione della distanza  $x$  dall'interfaccia della cappa cambia la velocità delle particelle in ingresso. Di fatto le caratteristiche di progetto devono occuparsi di rendere la velocità delle particelle della sorgente distanti dalla cappa  $x$  tale per cui vengano correttamente aspirate; il parametro determinante diventa perciò la portata di campionamento.

Possiamo a questo punto tirare le somme sulla progettazione dei sistemi di aspirazione locale, se devo progettare un impianto di aspirazione industriale il concetto base è quello della velocità di cattura, pertanto esistono delle tabelle che mettono in relazione la velocità di cattura minima necessaria in relazione alla sorgente emissiva; a seconda di eventuali interferenti piuttosto che della significativa tossicità della sostanza si utilizzano velocità di catture superiori o inferiori allo standard riportato.

Visto che quasi mai l'aria in ambienti industriali è calma, risulta spesso molto utile consultare le curve di isovelocità del fronte di diverse cappe, flangiate e non flangiate a seconda che si voglia o meno direzionare l'aspirazione così da intercettare le sole aree effettivamente inquinate. Va poi ricordato che seppur la ventilazione locale sia molto più efficiente della ventilazione generale, ci sono alcuni casi in cui non va adoperata come soluzione come nei casi in cui si trattano impianti che non possono avere le cappe vicine.

Fino ad ora, dunque, il binomio è stato quello di occuparsi di ventilazione con delle cappe aspiranti per intercettare e captare il contaminante evitando di disperderlo, esistono però dei sistemi che lavorano su due fronti: aspirando da una parte e creando una corsia preferenziale per l'aria dall'altra così da creare un getto di spinta verso la zona di estrazione. Parliamo della ventilazione push and pull. Il principio è quello di un'aspirazione direzionale con risultato la stessa efficienza di una cappa molto grande ma in dimensioni nettamente più ridotte. Quello che è però necessario garantire è una distribuzione uniforme della portata, vale a dire che le perdite di carico dei fori di emissione devono essere prevalenti rispetto alle perdite di carico del condotto. Serve allora che il rapporto tra la velocità dell'aria che spinge dai fuori e quella che entra nel condotto per portarla ai fori devono avere rapporto circa 2, così come il rapporto dell'area dell'imbocco del condotto e la somma delle aree dei fori che immettono in ambiente l'aria in push. La norma tecnica richiede portate uniformi e velocità del getto alla faccia della cappa di almeno  $0,75 \frac{m}{s}$ .

Un tipo di cappe esistenti sono quelle a cortina e servono per le sorgenti galleggianti, di fatto esistono delle significative variazioni di temperatura tra gli oggetti e l'ambiente per cui si generano dei moti convettivi da cui si originano delle correnti per convezione naturale anche dette pennacchi; in questi casi risulta molto utile posizionare delle cappe aspiranti sospese sulle sorgenti calde così da intercettare i pennacchi. Quindi se la sorgente ha dimensioni trascurabili rispetto all'intero ambiente e crea dei pennacchi, di questi posso trovare i parametri caratteristici con relazioni caratteristiche esistenti in letteratura per cui posso conoscerne la velocità, la

temperatura e la portata volumetrica; di fatto perché il pennacchio e quindi le sue caratteristiche dipendono dalla sorgente e dal flusso termico convettivo che genera:

$$\text{flusso termico convettivo}_{\text{sorgente}} = k_{\text{sorgente}} * \text{Potenza termica}_{\text{sorgente}}$$

È importante che la portata della cappa dia almeno 1,21 volte la portata del pennacchio e che la velocità frontale della cappa sia maggiore di  $1,5 \frac{m}{s}$  se no non ho la certezza di catturare il pennacchio.

Focalizzandoci sulle superfici orizzontali, queste creano dei flussi convettivi instabili per cui si staccano dalla superficie e tendono a seguire la fluidodinamica della stanza; in questi casi il modello da usare è comunque quello puntiforme, ma rispetto alla sorgente reale va ipotizzata una sorgente virtuale puntiforme che abbia le stesse caratteristiche di sospensione così che sia sufficiente applicare delle modifiche al modello per determinare i parametri di progettazione necessari.

Nel caso in cui le sorgenti emettano in maniera significativamente direzionale e con una velocità spinta, allora è spesso efficiente sfruttare il processo di formazione dell'inquinante per confinarlo, posizionando cioè le cappe lungo la traiettoria di espulsione o generazione dell'inquinante; si chiamano cappe riceventi.

## RUMORE

Il rumore è il principale rischio fisico, si parte dal presupposto che i corpi che vibrano in un mezzo sono sorgenti sonore, cioè le loro vibrazioni danno origine a delle variazioni di pressione nell'aria che fanno sì che si alternino delle zone di sovrappressione che sono quelle in cui l'aria si comprime e delle zone di depressione che sono quelle in cui c'è rarefazione dell'aria. Quello che accade è dunque che la pressione diventa così una funzione del tempo  $P = P_{atm} + P(t)$ .

Questo perché il suono è caratterizzato da un'onda e un'onda è caratterizzata da due parametri, la lunghezza d'onda e il periodo,  $v = \frac{\lambda}{T_{periodo}} =$

$\lambda f = \sqrt{\frac{k}{\rho}}$  è la velocità del suono nel mezzo dove  $k$  è la costante di compressibilità mentre  $\rho$  è la densità del mezzo.  $k = \rho \frac{dP}{d\rho}$  ma per i gas ideali

$k = \gamma P$  con  $\gamma = \frac{c_p}{c_v}$  per cui se si rimettono insieme tutti i pezzi:  $v = \sqrt{\frac{k}{\rho}} = \sqrt{\frac{\rho \frac{dP}{d\rho}}{\rho}} = \sqrt{\frac{dP}{d\rho}} = \sqrt{\frac{\gamma P}{\rho}}$  con  $P = \rho RT$  si ha  $v = \sqrt{\frac{\gamma \rho RT}{\rho m}} = \sqrt{\frac{\gamma RT}{m}}$  in sintesi

$v = f(T)$ , cioè dipende solo dalla temperatura e non dalla pressione o dalla densità e se aumenta la densità del mezzo aumenta la velocità del suono.

Il rumore è un insieme di onde senza accostamento armonico né periodicità, le frequenze udibili dall'orecchio umano sono quelle tra i 16 e i 16000Hz che è una scala molto ampia, motivo per cui si preferisce misurare il rumore in scala logaritmica e cioè in decibel.

L'energia irradiata dalla sorgente nell'unità di tempo si chiama potenza acustica e si misura in Watt. L'intensità acustica è invece la quantità di energia trasmessa dall'onda sonora per unità di tempo attraverso l'unità di superficie e si misura in Watt al metro quadrato, il riferimento è  $I_0 = 10^{-12} \frac{W}{m^2}$  per  $p_0 = 2 * 10^{-5} Pa$ .

Il livello di intensità è:

$$L_i = 10 \log \frac{I}{I_0}$$

Il livello di pressione sonora è:

$$L_p = 10 \log \frac{p^2}{p_0^2}$$

Se si raddoppia l'intensità allora il livello dell'intensità aumenta di 3dB, se raddoppia la pressione allora il livello di pressione sonora aumenta di 6dB.

L'orecchio umano è più sensibile all'intervallo di frequenze tra i 2000 e i 5000 Hz, motivo per cui la misura dell'intensità sonora viene ponderata secondo una scala che tiene in considerazione la ricezione dell'orecchio umano e cioè la curva di ponderazione A la cui unità di misura sono i dB(A), ma esistono anche la curva di ponderazione B, C, D che rappresentano invece le correzioni applicate dai filtri:

$$L_{A_{eq}, t_e} = 10 \log_{10} \left( \frac{1}{t_e} \int_0^{t_e} \left( \frac{P_A}{P_0} \right)^2 dt \right).$$

Il tempo di esposizione è una variabile molto importante ed è il motivo per cui si calcola l'esposizione quotidiana personale  $L_{EP,d}$  e quella settimanale professionale  $L_{EP,w}$ :

$$L_{EP,d} = L_{A_{eq}, t_e} + 10 \log_{10} \frac{t_e}{t_0} [dB(A)]$$

$$L_{EP,w} = 10 \log_{10} \left( \frac{1}{5} \sum_{k=1}^m 10^{0,1 * L_{ep,d}^{(k)}} \right) [dB(A)]$$

Esiste un legame tra il livello di pressione sonora  $L_p$  nello spazio circostante la sorgente e il livello di esposizione settimanale:

$$L_P = L_W + 10 \log_{10} \frac{1}{4\pi r^2} = L_W - 20 \log_{10} r - 11$$

Per cui se raddoppia quindi la distanza dalla sorgente il livello della pressione sonora dimezza.

Se la sorgente dovesse incontrare nel suo raggio di azione degli ostacoli o essere direzionata per la presenza di alcune superfici allora si aggiunge un fattore correttivo Q:

$$L_P = L_W + 10 \log_{10} Q - 20 \log_{10} r - 11$$

Esistono degli interventi di bonifica acustica che possono essere introdotti:

- riduzione della rumorosità intervenendo sulle sorgenti cioè rimuovendo urti e attriti;
- insonorizzazione delle sorgenti agendo sulle macchine cioè usando ad esempio dei silenziatori;
- insonorizzazione dell'ambiente segregando la sorgente cioè incabinandola;
- segregazione dell'area operativa cioè costruendo delle cabine di riposo e lavoro per gli addetti;
- interventi sulle strutture e sugli impianti cioè installare dei fonoassorbenti ambientali o modificando il layout.

Ci occupiamo adesso proprio della diminuzione della trasmissione per via aerea e cioè usando il fonoisolamento. Se ho degli scomparti divisi da una parete e una sorgente sonora emana energia, questa parte come energia incidente e si scompone in energia riflessa che torna in qualche modo indietro, energia trasmessa all'altro scomparto ed energia assorbita dal tramezzo che divide gli scomparti; se il tramezzo è un pannello omogeneo allora le facce vibreranno all'unisono, se è composto allora parte dell'energia incidente può essere dissipata. A questo proposito si può calcolare l'indice di attenuazione acustica  $R = 10 \log_{10} \frac{E_i}{E_t}$ .

Quindi se il pannello che divide gli ambienti è composto ci sarà una perdita di trasmissione sonora, infatti se R è maggiore di 40dB allora si può dire che il pannello fa buona dissipazione, se è minore di 10dB allora la dissipazione è scarsa.

Se in una stanza assieme ad una sorgente c'è un ricevitore, questo non udirà solo le onde incidenti, ma anche quelle riflesse, se le pareti hanno potere fonoassorbente, tipico dei materiali porosi o corrugati, allora il rumore sarà più basso perché  $E_r \ll E_t + E_a$ , il contrario è per le pareti riflettenti nonché i materiali lisci come il vetro e il cemento. Per questo ad ogni materiale è associato un coefficiente  $\alpha = \frac{E_i - E_r}{E_i}$  che se pari a 0,9 vuol dire che assorbe il 90% dell'energia incidente.

I materiali acustici per fonoassorbimento si dividono in:

- assorbitori per porosità come i poliuretani;
- assorbitori per risonanza di membrana o pannelli vibranti che sono selettivi per range di frequenza e possono essere tavole o tasselli acustici come tavole in cellulosa perforate oppure assemblaggi acustici speciali come pannelli compositi o assorbitori sospesi;
- assorbitori per risonanza di cavità anche detti risuonatori.