



**UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI REGGIO CALABRIA**  
*ISTITUTO DI INGEGNERIA CIVILE ED ENERGETICA*

D. Barbieri, M. Pietrafesa, G. Rizzo

**QUALITA' DELL'ARIA INTERNA E REQUISITI DI VENTILAZIONE**  
**Classificazione degli inquinanti, riferimenti normativi, metodi di calcolo**

**QUADERNI DI FISICA TECNICA ED ENERGETICA.**

**SERIE: MEMORIE SCIENTIFICHE.**

Aprile 1996

## Introduzione

Gli studi sulla qualità dell'aria venivano identificati, fino a qualche anno addietro, con l'analisi di problemi inerenti l'inquinamento atmosferico, argomento che, fino agli inizi degli anni '70, polarizzava quasi esclusivamente l'interesse nel settore sia da parte della comunità scientifica che dell'opinione pubblica e verso il quale erano conseguentemente indirizzati la maggior parte delle ricerche e degli interventi normativi in merito predisposti.

Riguardo a tale forma di inquinamento, pertanto, parecchie nazioni dispongono già da tempo di sistemi per l'identificazione ed il controllo su vasta scala delle sorgenti inquinanti, al fine di limitare i danni alla salute umana, oltre che alla biosfera in generale, e delle relative normative in materia.

Tuttavia è ormai provato come l'esposizione alle sostanze inquinanti tossiche e radioattive aerodisperse negli ambienti confinati, industriali e non, risulti generalmente superiore rispetto a quella relativa agli inquinanti presenti nell'atmosfera.

Ciò nonostante le normative richiedono, nell'ambito di tale tipo di ambienti, controlli severi solo per quelli aventi carattere industriale (che comportano i cosiddetti rischi "professionali", che interessano categorie ben definite di lavoratori addetti a particolari attività), rivolgendo minore attenzione a quelli adibiti ad attività di vita e di lavoro (comunemente definiti *indoor*) quali abitazioni, scuole, ospedali, uffici, edifici pubblici, mezzi di trasporto, ecc..

Tuttavia si è constatato, invece, come l'inquinamento presente in tali ambienti, dovuto alle sostanze emesse da sorgenti sia interne (strutturali o relative agli occupanti), che esterne all'ambiente stesso, sia tutt'altro che trascurabile, ed i rischi presenti per gli occupanti risultino dello stesso ordine di grandezza di quelli riscontrati negli stabilimenti industriali.

In genere si designa con il termine *inquinamento indoor* tale particolare forma di inquinamento che interessa l'aria e, più in generale, l'ambiente interno dei luoghi confinati nei quali si svolgono attività umane, anche a carattere di svago o di riposo, ossia quei luoghi destinati alla permanenza, anche breve, ma ripetuta, di persone.

Una graduale presa di coscienza delle dimensioni del problema, unita alla crescente richiesta di un generale miglioramento della qualità della vita in senso lato, ha fatto pertanto crescere di recente nella comunità scientifica la convinzione che l'inquinamento indoor, soprattutto all'interno di ambienti non industriali, meriti la stessa, se non maggiore attenzione dell'inquinamento outdoor. Ciò anche in vista del fatto che sempre più gente trascorre gran parte del suo tempo in tali ambienti, soprattutto nei paesi economicamente più sviluppati.

Inoltre, quest'attenzione è stata accresciuta dal manifestarsi di un nuovo tipo di problema, strettamente associabile al clima interno, che vede un gran numero di persone svolgenti attività di

lavoro in contesti non industriali manifestare sintomatologie in qualche misura ascrivibili alle non confortevoli condizioni ambientali interne dell'edificio in cui lavora.

Sulle cause specifiche di tali malesseri, che sembrano risiedere in una complessa ed eterogenea interazione di diversi fattori, al momento c'è poca informazione. Per tale ragione un gruppo di esperti dell' "Organizzazione Mondiale della Sanità" (*World Health Organization, WHO*) ha genericamente attribuito a quel complesso di malesseri (e nei casi più gravi patologie) associati alla fruizione di un edificio, imputabili genericamente a difetti strutturali o di gestione del sistema edificio-impianto, il nome di *Sindrome da Edificio Malato* (WHO, 1987; EEC, 1989a).

L'insieme di tali ragioni ha fatto sì che negli ultimi vent'anni tale forma di inquinamento si sia gradualmente rivelata come un problema di grande rilevanza scientifica, economica e sociale. Pertanto, anche grazie all'affinarsi delle tecniche sperimentali di monitoraggio, i problemi inerenti le condizioni ambientali di ambienti interni, di vita e di lavoro, con i relativi risvolti sanitari, tecnici ed economici sono stati, negli ultimi anni, oggetto di particolare interesse da parte di studiosi di tutto il mondo, suscitando momenti di aggregazione e confronto che hanno visto coinvolte competenze di diversi settori, da quello medico, a quello chimico, biologico, ingegneristico, legislativo, ecc..

Parecchi sforzi sono stati profusi, a livello sia nazionale che internazionale, anche nella redazione di adeguate normative in materia cui riferirsi per realizzare negli ambienti condizioni di salubrità e benessere. In particolare sono stati rivisti i principali standard esistenti, cercando di definirne dei nuovi contenenti linee-guida e prescrizioni tecniche sulle tecnologie edilizie ed impiantistiche atte a garantire, nel rispetto dei requisiti di sicurezza ed efficienza energetica, la verifica di tali standard.

Conoscere le dimensioni del problema, i meccanismi scatenanti, definire appropriate metodologie di indagine e misura, individuare soluzioni tecnologiche migliorative e tecniche d'intervento per il risanamento degli "edifici malati", mettere a punto normative efficaci risulta infatti, al momento, di fondamentale importanza per affrontare e cercare di risolvere un problema che si presenta estremamente complesso, con elevate ricadute sociali ed economiche e che non accetta soluzioni semplicistiche.

# **CAPITOLO I: ASPETTI GENERALI DEL PROBLEMA**

## **1. Condizioni ambientali interne**

E' noto che le condizioni ambientali interne di un edificio dipendono da più fattori, quali le condizioni di illuminazione, acustiche, termoigrometriche e di qualità dell'aria; ciò nonostante sono in genere le ultime due ad essere più spesso associate a condizioni ambientali interne inaccettabili.

Tuttavia, la possibilità di intervenire su tali fattori è condizionata dal livello di conoscenze attualmente raggiunto nei due campi scientifici più direttamente investiti dal problema, ossia quello che analizza le condizioni di benessere termoigrometrico e quello che si occupa di qualità dell'aria interna.

Per quanto riguarda il primo, al momento si dispone di strumenti progettuali, di tecnologie per la realizzazione ed il controllo, di metodi e strumenti di misura ed anche di normative adeguate. Inoltre il livello di approfondimento raggiunto è tale da consentire la comprensione delle relazioni esistenti fra i diversi fattori e la relativa influenza sugli occupanti, prevedendone gli effetti già allo stadio di progetto (vedi ad esempio Alfano et al., 1987).

Riguardo alla qualità dell'aria indoor, invece, il livello di conoscenze oggi raggiunto, nonostante i progressi degli ultimi anni, non è ancora tale da fornire agli operatori di campo strumenti di lavoro adeguati.

Come conseguenza di tutto ciò, le ricerche sulla qualità chimico-fisico-batteriologicala dell'aria e la realizzazione di livelli accettabili di qualità dell'aria negli ambienti interni costituiscono, al giorno d'oggi, l'impegno prevalente sia dei ricercatori della materia che delle industrie operanti nel campo dell'edilizia, del riscaldamento, della ventilazione e dei sistemi di condizionamento.

## **2. Origini dell'inquinamento indoor**

L'inquinamento indoor è sempre esistito, sebbene sotto forme meno gravi di quelle odierne, ed è rimasto per parecchio tempo nascosto anche agli specialisti. Una reale presa di coscienza del problema ha infatti richiesto anni, poiché gli effetti evidenti sull'organismo umano sono prevalentemente cronici e comunque si manifestano nel lungo periodo, e poiché, inoltre, è solo da poco che il problema si è evidenziato con drammaticità nei paesi industrializzati.

Una rapida disamina del suo originarsi deve necessariamente partire dalla crisi petrolifera dell'inizio degli anni '70, in seguito alla quale sono state adottate politiche di risparmio energetico.

L'improvviso aumento dei prezzi petroliferi, unito al timore che le fonti di estrazione si esaurissero, indusse all'epoca tutti i Paesi industrializzati, forti consumatori, a varare norme per il contenimento dei consumi energetici, primo fra tutti quello dei consumi legati al riscaldamento degli immobili: è noto, infatti, che una grossa aliquota del consumo energetico nazionale è rappresentata dalle spese per la climatizzazione ed, in particolare, nei sistemi preposti allo scopo, dai costi del trattamento dell'aria di ricambio, che deve necessariamente essere portata nelle condizioni termoigrometriche di quella interna.

Le strategie di approccio al problema si indirizzarono allora verso due direzioni prevalenti: l'aumento del potere isolante dei muri perimetrali, delle coperture e dei serramenti, allo scopo di ridurre le perdite per conduzione, e l'aumento della tenuta d'aria di porte e finestre, per minimizzare le perdite dovute a convezione e le dispersioni.

In generale, una tale esigenza economica, accresciuta dalla convinzione che le principali sorgenti inquinanti risiedessero all'esterno, ha indirizzato la maggior parte degli interventi predisposti prevalentemente verso la *lotta agli spifferi*, con conseguente riduzione dei tassi di ricambio dell'aria. Gli edifici sono stati costruiti o equipaggiati sempre più a tenuta d'aria, riducendo anche le infiltrazioni e, conseguentemente, i tassi di ventilazione sono stati ridotti.

La "sigillatura" delle abitazioni, ma soprattutto quella degli uffici, ebbe conseguenze immediate: si verificò un rapido aumento delle malattie allergiche e polmonari e della velocità di diffusione di malattie infettive fra gli utenti di uno stesso immobile. Si constatò, inoltre, che la situazione era peggiore negli edifici dotati di impianto di condizionamento.

Collegare questi fatti con la "sigillatura" degli edifici fu immediato ed i risultati riscontrati in seguito alle prime campagne di analisi dell'aria interna e, più in generale, degli ambienti interni, mostrarono come l'aria contenesse sostanze nocive assai più numerose e pericolose di quelle presenti nell'aria esterna e confermarono come l'esistenza degli impianti di condizionamento spesso peggiorasse la situazione.

Venne alla luce, in tal modo, un problema nuovo, molto esteso ed articolato, di vasta ricaduta sociale e di non semplice soluzione.

### **3. Sorgenti inquinanti indoor**

Il livello delle conoscenze oggi raggiunto consente di affermare che, in aggiunta a quanto esposto, anche l'introduzione di nuove tecniche e nuovi materiali da costruzione, di materiali sintetici per i rivestimenti, per l'isolamento acustico e termico ha giocato un ruolo determinante nell'insorgere di tali problemi.

Si sa inoltre che anche alcuni materiali da costruzione tradizionali e da arredamento possono emettere sostanze inquinanti, talune anche radioattive (radon e suoi derivati): nel complesso, circa il 90% dei materiali utilizzati nell'edilizia e nell'arredamento presenta effetti inquinanti più o meno marcati.

Radon viene inoltre immesso negli edifici dal sottosuolo assieme all'aria che penetra, attirata da piccole differenze di pressione, attraverso crepe nelle strutture vicine alle fondamenta o dalle fessure intorno a porte e finestre o ancora dai fori per il passaggio di condutture e cavi elettrici, o disciolto nell'acqua potabile.

Inoltre gli studi condotti hanno mostrato come la scorretta gestione o manutenzione degli impianti di ventilazione possa trasformarli in terreno di coltura e/o veicolo per microrganismi e sostanze inquinanti.

Le attività degli occupanti e le condizioni igieniche rivestono infine un ruolo importante: la polvere, in particolare (sia quella dispersa nell'aria che quella depositata sulle superfici tessili), costituisce un fattore inquinante molto comune.

Nel complesso, quindi, è possibile sinteticamente classificare come sorgenti inquinanti i *materiali edili* utilizzati nell'edificio, gli *arredi*, la presenza (eventuale) di *impianti di ventilazione*

(ed anche il tipo di impianto), di *macchinari* ed *elettrodomestici*, gli *occupanti* e le *relative attività che vi svolgono*, compresa la gestione del sistema edificio-impianto.

Per l'elevato numero di sorgenti di emissione presenti in spazi ristretti e la conseguente elevata presenza di sostanze inquinanti l'inquinamento indoor si presenta quindi come una forma di inquinamento estremamente complessa, difficilmente controllabile.

## 4. Qualità dell'aria di un ambiente interno

### 4.1. Qualità percepita dell'aria

Come si è visto, la qualità dell'aria interna ad un ambiente è funzione di parecchi fattori, spesso interagenti in maniera complessa ed ancora non completamente nota.

Sinteticamente il giudizio delle persone riguardo le sue condizioni si esprime nel concetto di *qualità percepita dell'aria*, che rappresenta l'espressione di come esse realizzano la propria percezione dell'aria sotto forma di odori, irritazione o altri effetti sensorii.

In generale, gli occupanti di un ambiente richiedono, riguardo alle condizioni dell'aria in esso presente, che questa sia fresca, non viziata né irritante, e non dannosa per la salute.

Nasce pertanto l'esigenza di controllare la "qualità" dell'aria interna, sia in termini igienico sanitari, che di gradevolezza. La sua qualità può essere, in particolare, correlata al grado di soddisfazione espresso dagli occupanti, sulla base della piacevolezza nella respirazione e del rischio per la salute che comporta.

Riguardo a quest'ultimo, un'esigenza fondamentale è che l'aria non contenga contaminanti (sotto forma di gas, vapori, microrganismi e particolato) che superino valori limite di concentrazione, né fattori nocivi come la tossicità, la radioattività, ecc.

Conseguentemente la qualità dell'aria è alta se essa durante la respirazione viene percepita come fresca e piacevole e se il rischio di provocare malesseri agli occupanti risulta trascurabile.

La definizione di accettabilità per l'aria contenuta nello standard ASHRAE 62-1989 (ASHRAE, 1989) considera tale duplice aspetto di salubrità e di gradimento da parte degli occupanti. In particolare, la norma definisce come accettabile *l'aria che non contenga sostanze inquinanti in concentrazioni pericolose ed in cui la gran parte delle persone presenti si trovi in condizioni di soddisfazione*.

Tuttavia, per valutare la qualità dell'aria indoor usualmente si utilizzano due approcci differenti, che concentrano rispettivamente l'attenzione sulle sue caratteristiche, analizzando i livelli di concentrazione raggiunti dai vari inquinanti, e sulle persone che lo occupano, caratterizzando le sensazioni che l'aria respirata produce su di esse.

In relazione a quest'ultimo approccio, Fanger (1988) ha proposto una metodologia analoga a quella utilizzata per il benessere termoisometrico, che consente di esprimere quantitativamente la percezione dell'aria, in dipendenza delle varie emissioni inquinanti, tramite la percentuale di insoddisfazione. La qualità percepita dell'aria di un determinato ambiente viene giudicata da un campione di persone (che possono essere visitatori occasionali o già addestrati al riconoscimento degli odori) che ne indica il gradimento in base alla prima impressione ricevuta entrando nel locale.

In particolare, vengono introdotti due nuovi indici, l'*olf* ed il *decipol*, atti a quantificare l'inquinamento dell'aria rispettivamente all'emissione ed in relazione alla sua percezione da parte

degli esseri umani. L'inquinamento viene quindi espresso in *olf* di intensità della sorgente che, per un assegnato tasso di ventilazione, possono essere convertiti in *decipol* di aria percepita.

Poiché queste due nuove unità rappresentano un elemento essenziale per la caratterizzazione quantitativa delle sorgenti inquinanti, per il calcolo dei requisiti di ventilazione e per le misure di qualità dell'aria, nel seguito sarà riservata loro una disamina relativamente dettagliata (vedi paragrafo successivo).

In conclusione, è opportuno almeno accennare all'esistenza di un terzo metodo di valutazione della qualità dell'aria di un ambiente che, per caratterizzare il relativo inquinamento, si avvale della definizione di opportuni parametri caratteristici dell'ambiente stesso. Uno dei parametri utilizzati, ad esempio, è il cosiddetto *fattore di rivestimento*, che è dato dal rapporto fra le superfici di rivestimento tessile presenti in un ambiente ed il volume dell'ambiente stesso. Tale parametro, indicando l'estensione di un certo tipo di sorgenti inquinanti, fornisce una stima dell'inquinamento da esse provocato. Nella pratica, tuttavia, parametri di tale tipo si sono dimostrati scarsamente affidabili nei risultati.

#### 4.2. "Olf e decipol"

Per più di un secolo la qualità dell'aria è stata giudicata solo in base alla sua composizione chimica.

In ambienti industriali si sono stabiliti valori di soglia per ciascun componente chimico ed ulteriori limiti al di sotto dei quali il rischio può essere considerato accettabile.

In ambienti non industriali (uffici, scuole o abitazioni), invece, l'applicazione di un analogo criterio non ha fornito risultati soddisfacenti; alle basse concentrazioni quali sono quelle in esame anche le analisi chimiche forniscono poche informazioni riguardo gli effetti dei diversi inquinanti sugli esseri umani.

In seguito a ciò, storicamente il successivo passaggio logico è stato la constatazione della frequente superiorità dei sensi umani rispetto alle analisi chimiche e l'utilizzo dell'uomo in alternativa come misuratore. L'uso di campioni di soggetti umani è comune, d'altra parte, a parecchi altri campi della scienza (ad esempio le scienze dell'alimentazione).

In proposito vanno citati, come già accennato, gli studi di Fanger (1988) che, seguendo un approccio analogo a quello utilizzato per il benessere termoigrometrico, ha proposto una metodologia che consente di esprimere quantitativamente, tramite la percentuale di insoddisfatti, la qualità percepita dell'aria in dipendenza delle varie emissioni inquinanti.

A titolo di esempio, la figura 1 (EEC, 1992) riporta la percentuale di visitatori insoddisfatti in ambienti in cui le uniche sorgenti inquinanti sono rappresentate dagli occupanti, in funzione della concentrazione di CO<sub>2</sub>, scelta in questo caso come indice della concentrazione di bioeffluenti.

La figura 2 (Fanger et al., 1988) riporta invece, ancora per il caso di aria inquinata da bioeffluenti umani, la percentuale di insoddisfatti in funzione del tasso di ventilazione per persona standard (lavoratore adulto in stato sedentario ed in condizioni di comfort termico).

L'idea di base scaturita da tali studi è stata quella di esprimere ogni sorgente inquinante in funzione di una nota sorgente di riferimento.

La nuova unità definita allo scopo è chiamata *olf* e rappresenta *il tasso di emissione di sostanze inquinanti (bioeffluenti) da parte di una persona standard*, ossia da un adulto in posizione sedentaria, in condizioni di benessere e con uno standard igienico equivalente a 0.7 bagni/giorno.

Ogni altra sorgente inquinante viene quindi espressa tramite la potenza della sorgente equivalente, definita come il numero di persone standard (esprese in olf) necessarie per causare la stessa insoddisfazione provocata dalla sorgente inquinante reale.

L'olf trova corrispondenza in analoghe unità di misura utilizzate in altri campi, quali il *lumen* in illuminotecnica ed il *watt* in acustica.

Per definire l'olf si è scelta come sorgente di riferimento l'inquinamento prodotto dagli esseri umani sia perché i bioeffluenti emessi da un essere umano sono oramai ben noti, sia perché si dispone di maggiori informazioni sull'insoddisfazione causata da bioeffluenti umani piuttosto che da altri tipi di inquinanti: per più di un secolo, infatti, negli standard di ventilazione si è assunto che la maggiore sorgente inquinante, in edifici non industriali, fosse rappresentata dall'uomo.

L'esistenza di sorgenti inquinanti diverse dagli occupanti è stata provata infatti solo di recente, in seguito all'evidenza che anche in spazi non occupati il numero degli insoddisfatti risultava significativo. Si constatava inoltre come, anche se i livelli di concentrazione dei principali inquinanti risultavano bassi, parecchie persone trovavano inaccettabili le condizioni dell'aria ed, in alcuni casi, la loro percentuale cresceva se l'impianto veniva reso operativo.

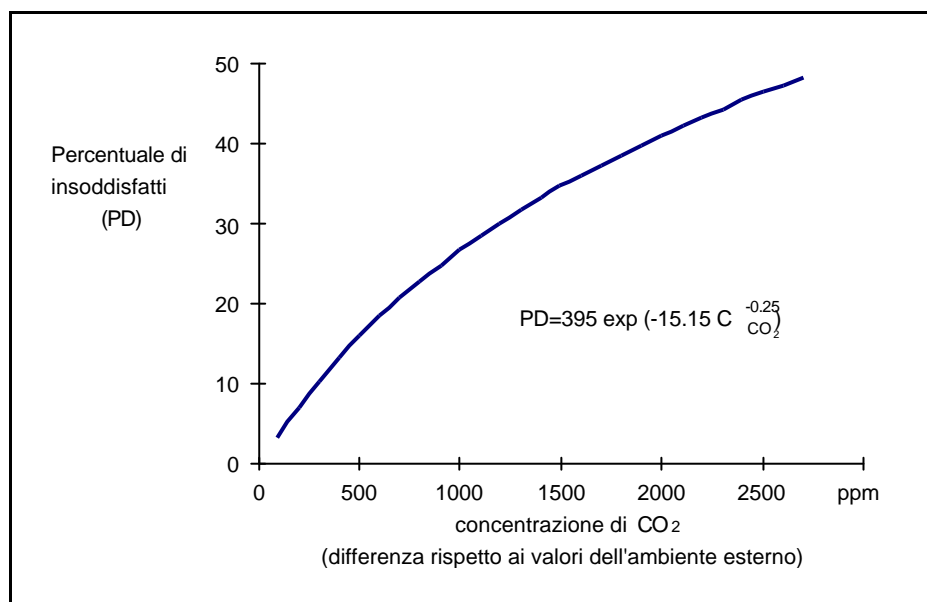


Figura 1 - Percentuale di insoddisfatti in funzione della concentrazione di anidride carbonica in ambienti in cui l'unica fonte di inquinamento è costituita dagli occupanti.



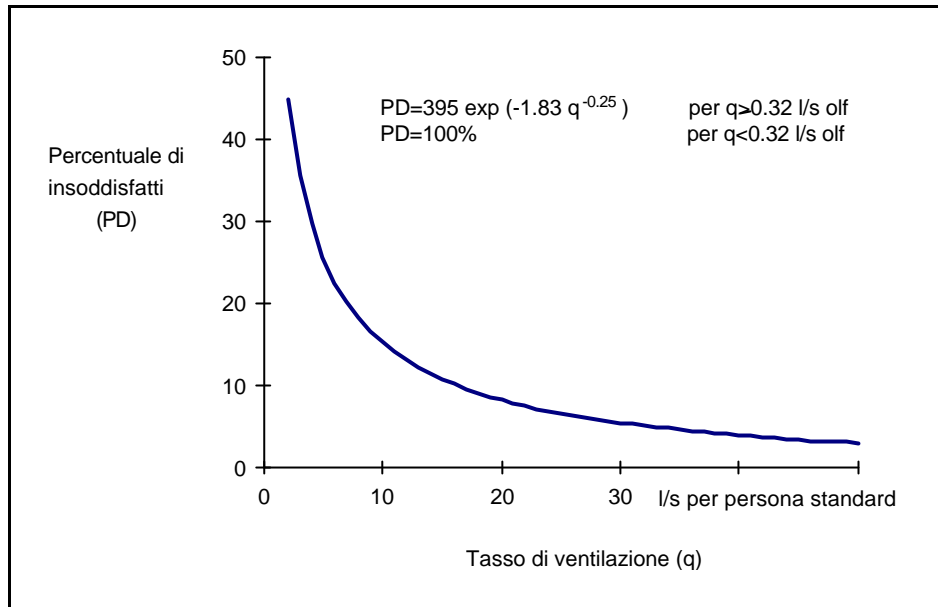


Figura 2 - Percentuale di insoddisfatti in funzione del tasso di ventilazione in un ambiente in cui il tasso di inquinamento è pari ad 1 olf.

Analogamente, per quantificare l'inquinamento dell'aria così come viene percepito dagli esseri umani si è introdotta una nuova unità, il *pol*.

Poiché la concentrazione dell'inquinamento dell'aria dipende dalla sorgente inquinante e dalla diluizione causata dalla ventilazione in interno e dal vento in esterno, il *pol* è stato definito come *l'inquinamento causato da una persona standard (un olf), ventilata con 1 l/s di aria non inquinata*. Pertanto:

$$1 \text{ pol} = 1 \text{ olf}/(l/s).$$

Per utilizzare unità di misura più conformi alle reali grandezze delle quantità in gioco, si è convenuto di utilizzare un sottomultiplo del *pol*, il *decipol*, costituito da un decimo di *pol*, che rappresenta pertanto *l'inquinamento causato da una persona standard (un olf), sottoposta ad una ventilazione di 10 l/s di aria non inquinata*, ossia

$$1 \text{ decipol} = 0.1 \text{ olf}/(l/s).$$

La qualità percepita dell'aria viene quindi definita come quella concentrazione di bioeffluenti umani che causerebbe la stessa insoddisfazione provocata dall'inquinamento reale.

La figura 3 (Fanger, 1988) riporta la relazione intercorrente tra qualità dell'aria espressa per mezzo della percentuale di visitatori insoddisfatti ed in decipol.

Va tuttavia precisato che il decipol esprime solo la qualità dell'aria percepita dagli esseri umani, non i possibili rischi per la salute.

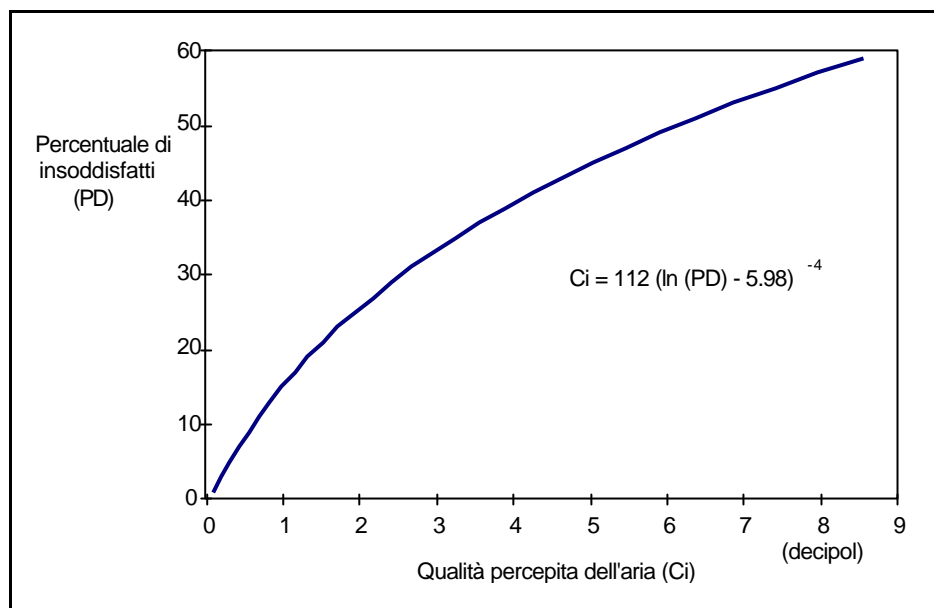


Figura 3 - Relazione tra la qualità percepita dell'aria espressa in percentuale di insoddisfatti ed in decipol.

Come l'olf, anche il decipol trova corrispondenza in analoghe unità luminose ed acustiche: in particolare, per quanto riguarda l'illuminotecnica, esso corrisponde al *lux*, che esprime l'illuminamento percepito dall'occhio umano, mentre in acustica corrisponde al *decibel* ponderato in curva "A", utilizzato per quantificare i suoni percepiti dall'orecchio.

L'uso delle due nuove unità introdotte non è ristretto agli ambienti interni, ma può anche soddisfacentemente caratterizzare l'inquinamento esterno.

Esse pertanto, consentendo la definizione quantitativa sia delle sorgenti inquinanti che del relativo inquinamento percepito, risultano, come si vedrà in seguito, basilari per il calcolo dei requisiti di ventilazione e per le misure di qualità dell'aria, sia in interno che in esterno.

#### 4.3. Ventilazione

La qualità dell'aria di un ambiente può essere controllata intervenendo sia sulle sorgenti inquinanti che sulla ventilazione.

Delle tecniche di riduzione delle emissioni inquinanti si parlerà più specificamente nel capitolo 5, mentre in questa fase verranno descritte alcune caratteristiche della ventilazione.

Un'appropriata ventilazione, meccanica o naturale, consente infatti, miscelando l'aria interna ad un ambiente e realizzandone così un'indispensabile redistribuzione, di rimuovere e/o diluire i contaminanti ivi generati e di ottenerne la qualità desiderata.

Per ogni ambiente occorre determinare la massima concentrazione ammissibile per i diversi contaminanti e prevedere, in base alle attività che vi svolgono, tassi di ventilazione adeguati, commisurati alla quantità di sostanze emesse nell'unità di tempo ed alla loro tossicità, che consentano di mantenervi livelli accettabili di qualità dell'aria.

Negli ambienti residenziali il valore del ricambio d'aria è limitato in basso dalla necessità di smaltire, in condizioni normali, gli odori corporali, gli inquinanti endogeni di origine umana e l'umidità; tuttavia tale valore può risultare inadeguato in situazioni particolari, ad esempio nel caso di

impiego di materiali che emettono radon e formaldeide, di uso di apparecchi di combustione, in presenza di molti fumatori, ecc.<sup>(1)</sup>.

La più semplice, e spesso l'unica, grandezza utilizzata per quantificare la ventilazione è la portata  $Q$  di aria di rinnovo introdotta nell'ambiente (espressa in m<sup>3</sup>/h o l/s). Tuttavia frequentemente viene utilizzata anche un'altra grandezza, denominata *numero di ricambi* (o *tasso di ricambio*) d'aria  $n$ , che consente di svincolarsi dalle dimensioni del sistema e si ottiene dividendo la portata  $Q$  per il volume  $V$  dell'ambiente. Se  $V$  è espresso in m<sup>3</sup>,  $n$  viene espresso in 1/h ed è detto *numero di ricambi orari*. L'inverso di  $n$  è detto invece *costante di tempo nominale della ventilazione*.

Entrambe queste grandezze dipendono esclusivamente dalle dimensioni dell'ambiente ventilato e dall'entità della portata d'aria di rinnovo e vengono genericamente indicate con il termine di *indicatori di portata*.

Esse tuttavia non forniscono indicazioni sulle modalità di distribuzione dell'aria e di diffusione degli inquinanti all'interno di un ambiente, per la cui conoscenza è necessario disporre di particolari informazioni relative sia agli aspetti fluidodinamici che all'interazione fra distribuzione dell'aria e modalità di rilascio degli inquinanti stessi.

Tuttavia, poiché ciò che è importante per gli occupanti è la qualità dell'aria nella zona di respirazione, la non uniformità dell'aria di un ambiente e l'ubicazione delle fonti di inquinamento rivestono particolare importanza, poiché influenzano le esigenze di ventilazione.

Per tenere conto di tale aspetto sono stati definiti particolari indicatori (che risultano più specificamente rivolti a valutare le prestazioni di un impianto di ventilazione meccanica), che sono noti rispettivamente come *indicatori di distribuzione dell'aria* ed *indicatori di qualità dell'aria*.

Fra questi ultimi, particolare importanza riveste un indice denominato *efficacia di ventilazione*, che rappresenta *la frazione di aria esterna immessa nell'ambiente che raggiunge la zona di occupazione* e viene definito quantitativamente dal rapporto tra le concentrazioni di inquinamento nell'aria di estrazione  $C_e$  e nella zona di respirazione  $C_i$  (EEC, 1992):

$$e_v = C_e / C_i$$

o, come è stata più recentemente definita in seguito alla revisione del progetto di norma citato (CEN, 1994),

$$e_v = \frac{C_e - C_s}{C_i - C_s}$$

in cui  $C_s$  rappresenta la concentrazione di inquinamento nell'aria di mandata.

---

<sup>(1)</sup> E' tuttavia possibile individuare diversi livelli di ventilazione: quella definita *vitale*, che assolve alle esigenze primarie, garantendo che la concentrazione di ossigeno, continuamente consumato dagli occupanti, non scenda al di sotto del 18%, e richiede il rinnovo di circa 2 m<sup>3</sup>/h (circa 0.5 l/s) d'aria per persona; quella *essenziale*, che consente di non superare nell'ambiente la concentrazione dello 0.5% in volume di biossido di carbonio e richiede un ricambio di almeno 8 m<sup>3</sup>/h (2.2 l/s) per persona ed infine quella di *comfort*, che garantisce l'asportazione degli odori e delle sostanze inquinanti e richiede la sostituzione di almeno 35 m<sup>3</sup>/h (9.7 l/s) d'aria per persona: in generale, è essenzialmente sulla ventilazione di comfort che si concentra l'attenzione negli studi sulla qualità dell'aria degli ambienti interni. La ventilazione richiesta per controllare i rischi per la salute va poi valutata separatamente.

$e_v$  dipende sia dalla distribuzione dell'aria che dall'ubicazione delle fonti di inquinamento, per cui può assumere valori diversi per inquinanti diversi. In particolare essa dipende dall'ubicazione e dalle caratteristiche sia dei terminali di mandata e di estrazione che delle sorgenti inquinanti e risulta legata, inoltre, alla temperatura e velocità dei flussi d'aria immessi nell'ambiente.

Se l'aria e gli inquinanti sono perfettamente miscelati l'efficacia di ventilazione è pari ad 1: ciò significa che la concentrazione di un dato inquinante ha lo stesso valore in ogni punto dell'ambiente e quindi anche in corrispondenza del sistema di estrazione.

Nella realtà accade che la concentrazione all'estrazione sia in generale diversa (minore o maggiore) che in ambiente. Se è maggiore, l'efficienza del sistema risulta maggiore di 1, la qualità dell'aria nella zona di respirazione risulta quindi migliore di quella nella zona di estrazione ed è pertanto possibile rispettare gli standard di qualità dell'aria adottando minori portate di ricambio.

Se la concentrazione all'estrazione è invece minore che in ambiente, l'efficienza risulta minore di 1, la qualità dell'aria nella zona di interesse è peggiore e quindi la portata di ricambio necessaria risulta maggiore.

$e_v$  può essere misurata sperimentalmente o calcolata ricorrendo a simulazioni numeriche.

Tuttavia la ventilazione, intesa come il ricambio dell'aria in un ambiente, acquista significato solo se si ammette che i contaminanti siano prodotti all'interno dell'ambiente stesso e che l'aria esterna non sia quindi contaminata: una tale ipotesi, ovviamente, non è rigorosamente verificata, ma può essere considerata accettabile.

Per ambienti a tenuta d'aria l'ipotesi è, ovviamente, automaticamente verificata.

Riguardo a tali ambienti è tuttavia necessario effettuare una considerazione. In essi accade spesso che la qualità dell'aria peggiori se viene attivato l'impianto di ventilazione e risulti migliore persino quando l'ambiente è ventilato solo dai leggeri flussi di infiltrazione: in generale, gli edifici ventilati naturalmente presentano qualità di aria migliori.

Spesso, infatti, gli impianti si comportano da amplificatori per la crescita di microrganismi, soprattutto in mancanza di controlli e manutenzione adeguata, rendendosi inoltre responsabili di diffusioni microbiche e di immissioni di contaminanti nell'ambiente.

Per prevenire ciò e garantire corrette prestazioni sono necessarie periodiche operazioni di manutenzione; in particolare, gli organi che necessitano di maggiori attenzioni risultano i filtri, gli scambiatori di calore e gli umidificatori.

Inoltre, se le sorgenti inquinanti presentano caratteristiche di emissione fortemente variabili nel tempo (ad esempio ambienti con forti variazioni della densità di occupazione), al fine di evitare fastidiose concentrazioni di inquinanti, il tasso di ventilazione meccanica va regolato in maniera da compensarne eventuali variazioni.

Va esaminata, in tal caso, la possibilità di adottare *sistemi di ventilazione controllata*, il cui uso si sta diffondendo negli ultimi anni, in cui la portata d'aria è governata dalla concentrazione di un opportuno inquinante presente in ambiente ed adottato come variabile-guida.

Tali sistemi presentano il duplice vantaggio di garantire una migliore qualità dell'aria e di ridurre al minimo il ricambio d'aria, e quindi i consumi per il suo trattamento termoigrometrico.

Essi risultano tuttavia economicamente convenienti solo se la produzione di inquinanti è *abbondante, fortemente variabile nel tempo ed imprevedibile, in relazione sia al momento che al punto di emissione* (Fracastoro, 1991). Se, al contrario, la produzione è modesta, sostanzialmente costante e prevedibile nel tempo è sufficiente adottare un sistema tradizionale a portata costante, utilizzando al più un sistema ad estrazione locale se il punto di produzione è noto in anticipo.



## CAPITOLO II: INQUINANTI INDOOR

L'inquinamento indoor è stato correttamente definito da Meloni e Grassi (1990) come "qualsiasi alterazione delle caratteristiche chimico-fisiche dell'aria, determinata sia da variazioni di concentrazione dei suoi normali costituenti, sia, e soprattutto, dalla presenza di sostanze estranee alla sua composizione normale, in grado di determinare effetti di danno e/o molestia all'uomo ed agli organismi viventi".

Gli inquinanti presenti nell'aria degli ambienti interni sono in gran parte gli stessi rilevabili all'esterno ed, in alcuni casi, provengono direttamente da sorgenti esterne: di questi ultimi, solo una minima parte proviene dal terreno, derivando, la gran parte (anche solo di quella che vi penetra per infiltrazione) dall'atmosfera esterna.

Le sostanze presenti con concentrazioni più elevate si originano, generalmente, nell'interno dell'edificio stesso o nelle strutture immediatamente sottostanti ed i loro valori elevati sono dovuti al fatto che devono risiedere in spazi relativamente ristretti.

Esse possono essere di tipo chimico, fisico o biologico e presentano ampia variabilità di concentrazione, in dipendenza soprattutto del tasso con cui ciascun inquinante viene immesso nell'atmosfera o nel terreno e del tasso di ventilazione esistente.

Un altro fattore importante che ne determina la concentrazione è la velocità di reazione con le specie chimiche presenti nell'aria o con le superfici interne: in particolare per la rimozione del biossido di azoto queste reazioni dimostrano la stessa efficacia della ventilazione.

Nel complesso la variabilità nei tassi di ingresso e di ventilazione e nelle velocità di reazione fanno sì che le concentrazioni della maggior parte degli inquinanti differiscano anche di diversi ordini di grandezza: in proposito l'esempio più rappresentativo è quello del radon, nelle cui concentrazioni si sono riscontrate variazioni anche di quattro ordini di grandezza.

La quantità di particelle in sospensione e l'andamento dei flussi d'aria nell'edificio influenzano inoltre anche la forma chimica e la concentrazione dei prodotti di decadimento delle sostanze radioattive presenti nell'aria interna (in particolare del radon).

La concentrazioni dei gas e dei vapori sono generalmente espresse in parti per milione in peso ( $\text{ppm}_p = 1 \text{ mg/kg}$ ) o più frequentemente in volume ( $\text{ppm}_v = 1 \text{ cm}^3/\text{m}^3$ ), oppure in unità di massa per unità di volume ( $\text{mg}/\text{m}^3$  o  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ). In particolare si ha:

$$(\text{ppm}_v \cdot \text{peso molecolare})/24.45 = \text{mg}/\text{m}^3.$$

La tabella 1 riporta i fattori di conversione da  $\text{ppm}_v$  a  $\text{mg}/\text{m}^3$  (o  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) per alcune fra le più comuni sostanze inquinanti indoor.

Tabella 1 - Fattori di conversione da  $\text{ppm}_v$  a  $\text{mg}/\text{m}^3$  per alcuni inquinanti indoor (a 1 bar e 20°C).

Inquinante	Fattore di conversione
Monossido di carbonio (CO)	1 ppm = 1.149 mg/m <sup>3</sup>
Biossido di carbonio (CO <sub>2</sub> )	1 ppm = 1.806 mg/m <sup>3</sup>
Biossido di azoto (NO <sub>2</sub> )	1 ppm = 1.880 mg/m <sup>3</sup>

Formaldeide (HCHO)	1 ppm = 1.231 mg/m <sup>3</sup>
--------------------	---------------------------------

Le concentrazioni di radon o altre sostanze radioattive sono invece espresse in picroCurie per litro (pCi/l) o per chilogrammo (pCi/kg) o ancora in Becquerel su metro cubo (Bq/m<sup>3</sup>), dove il Curie ed il Becquerel sono unità di misura dell'attività di una sostanza radioattiva (il Curie fa parte del Sistema Internazionale), che rappresenta *il numero di nuclei della sostanza che decadono nell'unità di tempo*. In particolare il Curie rappresenta *il numero di decadimenti radioattivi che ha luogo in un secondo in un grammo di Radio-226 (37 miliardi)*, ossia 1 Ci = 3.7·10<sup>10</sup> decadimenti al secondo, mentre il Becquerel è pari, indipendentemente dalla natura della radiazione, ad un *decadimento al secondo*. Pertanto 1 Ci = 3.7·10<sup>10</sup> Bq ed 1 pCi/l = 37 Bq/m<sup>3</sup>.

Per quantificare invece l'esposizione alle radiazioni ionizzanti si fa riferimento alla *dose assorbita*, che indica *la quantità di energia che viene assorbita sotto forma di radiazione*: a tal fine un'unità di misura frequentemente utilizzata è il Sievert (Sv), che esprime *la quantità di energia fornita dalla radiazione all'unità di massa*. Si ha 1 Sv = 1 J/kg.

Si definisce inoltre *dose equivalente il prodotto della dose assorbita per il fattore di qualità della radiazione*, che ne quantifica il potenziale di danno biologico. La *dose equivalente effettiva* è data invece dalla *somma dei prodotti delle varie dosi equivalenti relative ai diversi organi e tessuti, pesate con riferimento ai rischi rispettivi*.

I valori di concentrazione limite possono invece essere espressi in termini di MAC (*Maximum Allowable Concentration*) e di AIC (*Acceptable Indoor Concentration*) (IEA, 1987).

Per chiarire il significato di tali termini, tutti inerenti i valori di concentrazione massima ammissibile, occorre precisare che essi sono basati su criteri di tipo occupazionale.

In ambienti di lavoro, cinema, teatri, ed in generale in tutti quegli ambienti nei quali la permanenza è ridotta nel tempo (in genere meno di 8 ore) e gli occupanti si trovano in buone condizioni fisiche, è giustificata la definizione di valori di concentrazione tollerabile relativamente elevati. In tal caso è appropriato parlare in termini di *concentrazione massima ammissibile* (MAC). In ambienti residenziali invece, che generalmente sono occupati stabilmente soprattutto da bambini ed anziani, ossia da persone più vulnerabili, è necessario che i valori massimi ammissibili per le concentrazioni delle varie sostanze inquinanti risultino necessariamente più bassi. Per tale tipo di ambienti è opportuno quindi ragionare in termini di *concentrazione interna accettabile* (AIC), che sta ad indicare la concentrazione di soglia al di sotto della quale non si constatano effetti negativi sull'uomo, o, se se ne osservano, questi sono trascurabili.

## 1. Classificazione degli inquinanti indoor

Si è detto che le sostanze presenti negli ambienti indoor possono essere di tipo chimico, fisico o biologico: una loro schematica classificazione è riportata in tabella 2.

Per comodità di riferimento, gli stessi inquinanti possono essere accorpate in 4 principali raggruppamenti, comprendenti:

- *sostanze chimiche (organiche ed inorganiche);*
- *particolato;*
- *radionuclidi;*
- *organismi microbiologici.*

Le sostanze chimiche comprendono una serie di composti organici ed inorganici, soprattutto gas e vapori. Fra le sostanze organiche citiamo, in particolare, i composti organici volatili (indicati anche con il termine VOC, *volatile organic compounds*), fra i quali il più pericoloso è la formaldeide, mentre fra quelli inorganici ricordiamo gli ossidi di carbonio e di azoto e l'ozono, fra i quali il più dannoso è l'ozono.

Tabella 2 - Classificazione dei principali inquinanti indoor in base alla diversa natura.

Tipo di inquinante		
Chimico	Fisico	Biologico
Inquinanti di origine esterna Biossido di carbonio Fumo Prodotti di combustione Particolato solido Composti organici volatili Formaldeide Radon e particelle radioattive Amianto	Radiazioni elettromagnetiche Umidità	Gas metabolici Microorganismi (funghi, virus, batteri)

Il particolato (*suspended particulate matter, SPM*) include la polvere, le fibre di amianto ed il polline. Esso viene emesso principalmente da sorgenti discontinue legate all'attività umana (fumo e polveri), continue (alcuni materiali presenti nelle abitazioni, quali l'amianto) o semicontinue (processi di combustione). In particolare, la causa principale di polvere nell'aria è il fumo di tabacco, mentre le attività degli occupanti e le condizioni igieniche nell'ambiente influenzano la quantità di polvere depositata.

I radionuclidi comprendono particelle e gas radioattivi: fra di essi quello rilevato in maggiori quantità nell'aria degli ambienti interni è il radon.

Gli organismi microbiologici includono una grande varietà di organismi patogeni, come i virus, i batteri ed i funghi.

## 2. Effetti dell'inquinamento sull'organismo umano

La vasta gamma di tipologie e concentrazioni di inquinanti esistente negli ambienti indoor implica ovviamente un'altrettanto varia e corposa serie di rischi per la salute umana. In relazione agli effetti sull'uomo i principali inquinanti possono essere suddivisi, in base all'azione prevalente da essi esercitata, in quattro gruppi (Meloni e Grassi, 1990):

- ad azione prevalentemente *irritante* (polveri, biossido di azoto, ozono, formaldeide, ecc.);
- ad azione prevalentemente *sensibilizzante* (pollini, fibre sintetiche, ecc.);
- ad azione prevalentemente *tossica* (monossido di carbonio, nicotina, metalli pesanti, ecc.);
- a sospetta/probabile azione *cancerogena* (amianto, radon, formaldeide, idrocarburi policiclici aromatici).



Tuttavia, la gran parte degli inquinanti che provocano effetti irritanti o sensibilizzanti possono anche provocare l'insorgere di patologie croniche o acute (afezioni dell'apparato respiratorio, reazioni allergiche).

Inoltre, solo in un numero limitato di casi (quali, ad esempio le reazioni allergiche acute o l'avvelenamento da monossido di carbonio) esiste una relazione diretta fra l'esposizione ad un dato inquinante ed il conseguente insorgere di un determinato effetto nocivo sulla salute; molto più spesso accade invece che i casi di malattie respiratorie o di cancro non siano direttamente associabili ad una specifica sostanza o ad un singolo fattore.

In questo contesto l'origine dei problemi sanitari classificabili come sindrome da edificio malato, imputabili soprattutto agli scarsi livelli di qualità dell'aria interna, è probabilmente da attribuirsi alla complessa interrelazione esistente fra diversi fattori legati all'inquinamento aventi, come visto nel capitolo precedente, carattere sia ambientale che progettuale, costruttivo, di gestione e fruizione.

Per tale ragione gli studi in materia sono attualmente condotti prevalentemente analizzando l'insorgenza di malattie su gruppi di persone soggette ad un'elevata esposizione a determinate sostanze, al fine di estrapolarne correlazioni statistiche fra i livelli di esposizione al singolo o a più inquinanti ed il successivo insorgere di patologie.

### 3. Inquinanti indoor e relative sorgenti

Nella tabella 3 è riportata una sintetica schematizzazione delle più comuni sostanze inquinanti presenti in ambienti indoor, associate ai diversi tipi di sorgenti (Masoero, 1991).

*Tabella 3 - Classificazione dei principali inquinanti indoor in relazione ai diversi tipi di sorgente.*

<i>Inquinanti di origine esterna</i>	
presenti nell'atmosfera provenienti dalle acque o dal sottosuolo	ossidi di carbonio (CO <sub>x</sub> ) ossidi di zolfo (SO <sub>x</sub> ) ossidi di azoto (NO <sub>x</sub> ) VOC particolato solido totale (PST) radon e particelle radioattive gas emesso dal materiale da diporto e dalle discariche
<i>Inquinanti prodotti dagli occupanti</i>	
prodotti dai processi metabolici provenienti da animali domestici originati dal fumo di tabacco prodotti durante la cottura dei cibi generati dall'uso di detersivi, prodotti igienici, ecc.	gas metabolici (CO <sub>2</sub> , umidità, aldeidi, esteri, alcoli) fumo di tabacco (CO, CO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , etc.) VOC microorganismi
<i>Inquinanti prodotti dall'edificio</i>	
emessi dai materiali da costruzione provenienti dagli arredi originati dalle finiture interne (pitture murali, rivestimenti, tappezzerie)	VOC formaldeide amianto radon microorganismi

<i>Inquinanti generati dall'impianto e dalle macchine</i>	
generati dall'impianto di condizionamento dell'aria prodotti negli apparecchi a combustione	prodotti di combustione (CO, CO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , O <sub>3</sub> , etc.) VOC
generati nelle apparecchiature d'ufficio, negli elettrodomestici, ecc.	microorganismi vapor d'acqua

La tabella 4 (rielaborata da Alberti et al., 1994) riporta invece una classificazione di maggiore dettaglio delle principali sorgenti inquinanti e delle varie sostanze che, potenzialmente, tali sorgenti sono in grado di emettere.

La figura 3 (Nero, 1988) riporta i diversi range di concentrazione di alcune fra le principali sostanze inquinanti.

Analizziamo in dettaglio ciascuna delle componenti che contribuiscono all'inquinamento complessivo.

*Inquinanti di origine esterna*

Le principali sorgenti inquinanti esterne sono rappresentate dagli insediamenti industriali e dal traffico veicolare. Le sostanze emesse (tabb. 2-3) possono essere presenti negli ambienti interni, ove penetrano per infiltrazione oppure attraverso i sistemi meccanici di ventilazione, con concentrazioni generalmente pari o inferiori a quelle esterne.

In gran parte tali emissioni sono costituite da prodotti di combustione provenienti dai gas di scarico delle automobili.

Di origine esterna sono anche i cosiddetti *microinquinanti*, costituiti da sostanze che, seppur presenti con concentrazioni molto basse, presentano tuttavia importanza dal punto di vista sanitario (ad esempio i metalli pesanti).

Fra gli inquinanti esterni di origine naturale è il radon, un gas radioattivo la cui principale fonte esterna è il gas che si origina dal terreno e dalle acque di falda e che, dal sottosuolo, penetra negli edifici per infiltrazione attraverso crepe nelle strutture vicine alle fondamenta o disciolto nell'acqua potabile. In questo gas il radon è presente in elevate concentrazioni ed in misura molto variabile, a seconda delle condizioni geologiche del luogo.

*Inquinanti prodotti dagli occupanti*

Il più comune fra gli inquinanti dovuti agli occupanti è la CO<sub>2</sub>, essendo il maggior costituente dei prodotti del metabolismo umano.

Fra gli inquinanti associabili alle attività umane uno fra i più nocivi è il fumo di tabacco che contiene, fra l'altro, monossido di carbonio, ossidi di azoto, particolato solido respirabile e contaminanti organici di varia composizione chimica (principalmente aerosol organici): in presenza di fumatori la portata d'aria di ricambio deve infatti aumentare di circa 3 o 4 volte.

Anche i prodotti per l'igiene personale e della casa, gli insetticidi, ecc. contribuiscono all'emissione di composti organici ed inorganici potenzialmente pericolosi: in particolare i pesticidi ed i detersivi liquidi emettono formaldeide, cloruro di metilene ed una vasta gamma di composti organici complessi.

*Inquinanti prodotti dall'edificio*

I materiali utilizzati per le strutture edilizie, per i rivestimenti e per gli arredi emettono sostanze inquinanti in misura non trascurabile. Alcuni materiali, tuttavia, emettono in maniera particolarmente

intensa solo durante i primi anni di vita dell'edificio, estinguendosi l'emissione dopo un certo periodo di tempo, mentre altri (soprattutto i materiali di rivestimento) possono accumulare sostanze inquinanti durante la fase di costruzione e riemetterle lentamente. In particolare, dai materiali da costruzione, dall'arredamento, dalle vernici e dai solventi deriva formaldeide, ma anche inquinanti meno noti, quali il cloruro di metilene, oltre ad una vasta gamma di composti organici più complessi.

Anche i collanti e le resine utilizzati nei laminati plastici e nei truciolati possono emettere, soprattutto nella fase iniziale di vita dell'edificio, notevoli quantitativi di formaldeide; tale composto viene originato inoltre, insieme ad altri inquinanti gassosi, dagli isolanti a base di schiuma di urea-formaldeide.

*Tabella 4 - Principali sorgenti inquinanti indoor e relative emissioni.*

	<i>Fonte</i>	<i>Emissione</i>
Acqua	Condutture	Nitrati, cloro, COV, batteri, radon, piombo ed altri metalli pesanti provenienti dalle tubature
Apparecchi di combustione	Apparecchi di riscaldamento a cherosene ed a gas in bombole, fornelli e caldaie a gas, apparecchi di riscaldamento dell'acqua, caldaie a nafta, stufe e caldaie a carbone	CO, CO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , SO <sub>x</sub> , H <sub>2</sub> S, O <sub>3</sub> , COV, polveri respirabili, aldeidi, idrocarburi aromatici policiclici, perdite di vapori, condensa, fumo
Aria	Aria esterna	Particelle, NO <sub>x</sub> , CO, CO <sub>2</sub> , SO <sub>x</sub> , COV
Collanti	Colle e mastici usati per piastrelle ed assemblaggi di mobili, guarnizioni di tenuta stagna, tappezzerie	COV (in particolare formaldeide), vapori tossici liberati durante l'applicazione e l'asciugatura.
Elettricità	Impianti elettrici ed elettrodomestici (televisori, computer, fotocopiatrici, apparecchi da cucina, attrezzi elettrici, ecc.) Frigoriferi Forni a microonde Illuminazione fluorescente (vecchie apparecchiature)	Ozono, radiazioni elettromagnetiche a bassa frequenza  CFC Radiazioni PCB provenienti da stabilizzatori ad accensione rapida
Impianti di condizionamento e di ventilazione, impianti di riscaldamento, umidificatori, climatizzatori.		Microorganismi, funghi, batteri e muffe, bioaerosol, CFC
Prodotti per la pulizia domestica e personale	Prodotti detergenti, lucidanti, candeggianti, disinfettanti, deodoranti e prodotti per l'igiene personale	Formaldeide, fenoli, cloruro di vinile, aldeidi, COV, benzene, toluene, chetoni, ammoniaca, candeggina, acidi minerali Vaporizzazioni con CFC
Arredamenti e rivestimenti in legno	Legno, truciolato, cartone, fibra e compensato usati per mobili, scaffalature, pavimentazioni e rifiniture murarie Trattamenti del legno	Vapori resinosi, COV, formaldeide (specie per prodotti nuovi ed in climi caldi ed umidi) Lindano, pentaclorofenolo (PCF), ossido di stagno (OSB) ed altri conservanti del legno
Materiali da costruzione	Terra, pietra, granito, pomice, cemento, mattoni refrattari, blocchi di aggregati, piastrelle di argilla ed allume, tufo Stucco, cemento, elementi di finitura in gres e fosfati Isolante di schiuma di formaldeide ureica per muri ad intercapedine. Materiali isolanti ed antincendio per tubature, caldaie e serbatoi; tegole, piastrelle, assi	Radon  Formaldeide, radon  Formaldeide  Minuscole fibre minerali e sintetiche, amianto
Materiali da rivestimento		Bioaerosol, COV, aldeidi

Materie plastiche	Imbottiture di sedie, materassi e cuscini Vinile nelle piastrelle, nelle apparecchiature elettriche, nei pannelli in legno, nella carta da parati Acrilico usato per lastre di finto vetro e rivestimento in stoffa Materiali termoplastici usati in numerosi prodotti domestici	Poliuretano Formaldeide ed altri vapori tossici, cloruro di vinile Vapori tossici Vapori, specialmente prodotti dal calore
Oggetti metallici	Pendole, vernici, tubature, mobili Tracce di metalli nell'acqua	Alterazione dei campi elettromagnetici
Persone, animali domestici, piante	Bioeffluenti Fumo di tabacco	Bioaerosol, aldeidi, COV CO, CO <sub>2</sub> , polveri respirabili, idrocarburi aromatici policiclici, COV
Pesticidi e fungicidi		Sostanze tossiche ed irritanti, possibili cancerogeni
Stoffe e fibre	Materiali sintetici	Vapori di formaldeide
Terreno	Tubature, cavi elettrici, crepe nelle strutture murarie	Radon, H <sub>2</sub> S, mercaptani
Vernici, coloranti e smacchiatori	Pareti, soffitti, mobili	COV, vapori tossici, metalli (piombo)

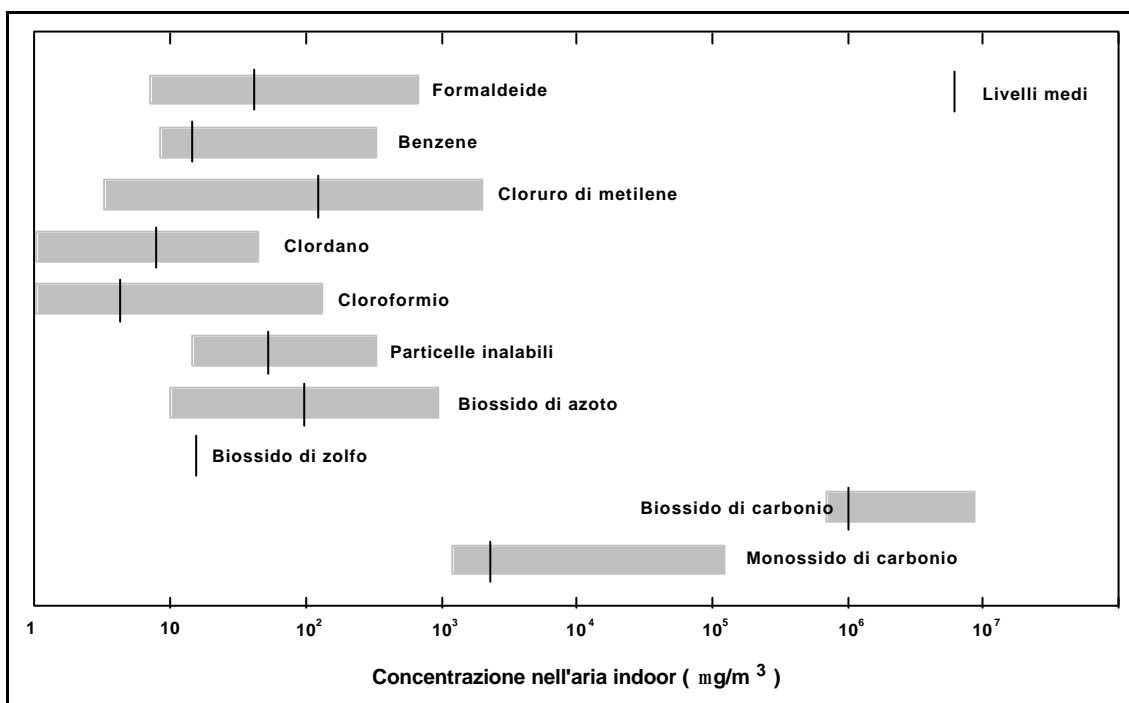


Figura 3 - Concentrazioni tipiche di alcune sostanze inquinanti indoor.

Alcuni materiali edilizi (cemento, mattoni, calcestruzzo, ecc.) emettono radon.

I polimeri sintetici utilizzati per i rivestimenti e gli arredi degradandosi emettono piccole quantità dei loro costituenti originali o di composti da essi derivati.

I tappeti e le moquette, generalmente costituiti da fibre artificiali, possono essere fonte di contaminanti organici e, talora, anche microbiologici.

Inoltre alcuni materiali impiegati per l'isolamento termo-acustico, come l'amianto e la lana di vetro, o per l'impermeabilizzazione, come il fibro-cemento (che contiene fibre di amianto), possono disperdere in ambiente fibre microscopiche pericolose per l'apparato respiratorio. L'amianto ed il fibrocemento sono tuttavia presenti solo in edifici di costruzione non recente.

### *Inquinanti prodotti dagli impianti e dalle macchine*

Una delle più importanti cause dell'inquinamento indoor è rappresentata dagli impianti di condizionamento che presentano carenze gravi a livello di progettazione, realizzazione o manutenzione: in particolare, essi si trovano a fungere da incubatori di germi e ricettacolo di colonie di muffe, lieviti, batteri, le cui spore sono all'origine di molte allergie e broncopolmoniti. Tale fenomeno genera inoltre una diffusione microbica all'interno dello stabile, ossia un rapido ed endemico aumento di infezioni fra gli utenti dello stesso immobile, climatizzato in tutte le sue parti dal medesimo impianto.

Particolarmente additati come luogo di generazione e veicolo di inquinanti e/o microorganismi sono i seguenti elementi dell'impianto (Raffellini e Taddia, 1990):

- *sistemi di umidificazione e torri evaporative*: poichè le vasche di raccolta dell'acqua di umidificazione, in mancanza di opportuni trattamenti dell'acqua stessa, possono divenire terreno di coltura di microorganismi (il problema non esiste invece se si adotta l'umidificazione a vapore). Per quanto riguarda le torri evaporative, in esse particolari temperature dell'acqua possono favorire la crescita della *Legionella Pneumophila*;
- *centrali di trattamento dell'aria*: è importante porre attenzione alla tenuta all'aria delle pannellature, alla presenza di interstizi o porosità (che possono divenire sede di depositi di sporcizia) e di zone di ristagno dell'acqua. Particolare attenzione va rivolta inoltre ai ventilatori ed alla sezione filtrante, che devono essere facilmente ispezionabili;
- *canalizzazioni*: anche qui è necessario verificare la tenuta all'aria, oltre che l'isolamento termico (evitando, allo scopo, l'uso di materiali porosi che possono trattenere sporcizia e/o disperdere pericolose fibre) e la protezione da agenti esterni nocivi. Anche tali elementi devono essere facilmente ispezionabili per la manutenzione;
- *terminali*: i ventilconvettori e le unità ad induzione richiedono una manutenzione frequente per eliminare depositi di sporcizia ed eventuali agenti patogeni.

Inoltre l'utilizzo di apparecchi di combustione (talora con difetti nel funzionamento), elettrodomestici da cucina a gas, scaldacqua senza ventilazione in ambienti non sufficientemente ventilati genera prodotti di combustione.

Tali apparecchi, che possono presentare le tipologie più svariate ed utilizzare diversi tipi di combustibili, sia gassosi (quali il gas, di rete od in bombola) che liquidi (gasolio o kerosene) o solidi (legna o carbone), scaricano i prodotti di combustione generalmente in esterno, ma talvolta direttamente negli ambienti: pertanto, in tutti quei casi in cui il processo di combustione non risulta facilmente controllabile si realizza, in ambienti con insufficienti apporti di aria esterna (e quindi bassa concentrazione di ossigeno) una combustione incompleta, con generazione di forti quantità di monossido di carbonio, l'inquinante indoor più pericoloso riguardo alle intossicazioni acute.

Altri inquinanti prodotti dalla combustione sono costituiti dalla gamma degli ossidi di azoto, dall'ozono e da alcuni derivati degli idrocarburi, la gran parte dei quali provoca irritazioni ed alcuni addirittura il cancro.

Anche gli impianti per il riscaldamento emettono quantità variabili di particelle che possono penetrare nelle vie respiratorie, insieme agli ossidi di carbonio e di azoto ed a composti organici in tracce.

Infine, anche le emissioni dei prodotti utilizzati nelle macchine da ufficio (fotocopiatrici, stampanti laser, ecc.) contribuiscono all'inquinamento indoor in misura non trascurabile.

#### **4. Disamina delle principali sostanze inquinanti presenti negli ambienti indoor**

Da quanto esposto in precedenza risulta come la gamma degli inquinanti indoor sia molto vasta e di difficile organizzazione: pertanto, nella pratica, sono solo gli inquinanti più frequentemente riscontrati con valori superiori a quelli limite a polarizzare l'attenzione delle normative e della ricerca. Ovviamente, in caso di particolari attività, è necessario fare riferimento anche ai valori limite di concentrazione delle specifiche sostanze presenti.

Tuttavia, in generale, è possibile individuare in quelle che seguono le sostanze che maggiormente hanno influenza sulla qualità dell'aria di un ambiente:

- *i prodotti di combustione;*
- *la formaldeide;*
- *il radon;*
- *i composti organici volatili;*
- *i gas metabolici;*
- *l'anidride carbonica;*
- *il fumo di tabacco;*
- *i microorganismi;*
- *il vapor d'acqua - l'umidità.*

Minore importanza rivestono, per la minore presenza riscontrabile:

- *gas emessi dal materiale di riporto e dalle discariche;*
- *amianto.*

Nel seguito viene riportata una breve descrizione delle sostanze elencate, salvo per quelle di maggiore interesse (prodotti di combustione, formaldeide, radon), per le quali è stata effettuata invece una disamina relativamente dettagliata, analizzandone le sorgenti, le concentrazioni associate, gli effetti sulla salute e le misure preventive.

##### **4.1. PRODOTTI DI COMBUSTIONE**

I prodotti di combustione sono sottoprodotti della combustione di carburanti fossili ad alte temperature.

La reazione di combustione dà origine, se realizzata in condizioni stechiometriche, ad anidride carbonica e vapor d'acqua, mentre se viene realizzata nelle condizioni reali (combustione incompleta) si originano anche altri sottoprodotti, prevalentemente dei composti, fra i quali il più pericoloso è il monossido di carbonio. In tutte le reazioni di combustione la formazione di tale prodotto può aumentare rapidamente di diversi ordini di grandezza per mancanza di ossigeno, quindi per effetto di un insufficiente apporto di aria esterna.

Un altro inquinante prodotto dalla combustione è l'ossido di azoto (NO). Tale composto presenta scarso interesse sanitario, ma può tuttavia dare luogo, per mezzo di complesse

reazioni, a composti irritanti o addirittura cancerogeni, quali il biossido di azoto (NO<sub>2</sub>), l'ozono (O<sub>3</sub>) ed alcuni derivati degli idrocarburi: fra di essi, in particolare, il biossido di azoto può raggiungere, per effetto di una scarsa ventilazione, livelli di concentrazioni che eccedono quelli consigliati.

### *Sorgenti*

Negli ambienti interni le sorgenti principali di tali prodotti sono rappresentate dagli apparecchi di combustione (stufe, caminetti, elettrodomestici a gas, ecc.) o scaldacqua senza ventilazione funzionanti in presenza di difetti o in ambienti non sufficientemente ventilati.

Tali sostanze sono inoltre generate dal fumo di tabacco, ancora in assenza di ventilazione adeguata.

Tuttavia, in alcuni casi, la presenza di tali prodotti in interno può essere dovuta, per particolari ubicazioni degli edifici a ridosso di strade trafficate, anche all'immissione negli ambienti di gas di scarico delle automobili o, se l'edificio è dotato di garage, alle infiltrazioni di gas da esso provenienti.

### *Concentrazioni ed esposizione*

La naturale concentrazione di monossido di carbonio nell'aria esterna è di 50-100 µg/m<sup>3</sup> (0.044-0.087 ppm), ma in aree urbane ad elevato tasso di inquinamento essa facilmente raggiunge e supera anche i 45 mg/m<sup>3</sup> (40 ppm), mostrando livelli medi urbani inferiori ai 20 mg/m<sup>3</sup> (18 ppm).

Negli ambienti interni le concentrazioni rilevate sono generalmente più elevate (maggiori di 50 mg/m<sup>3</sup>) per le ulteriori immissioni di CO ad opera di sorgenti interne e per la presenza di spazi più ridotti, che non consentono elevate diluizioni del gas.

La concentrazione massima ammissibile per tale gas negli ambienti confinati è di 28-57 mg/m<sup>3</sup> (25-50 ppm) in termini di MAC e di 1.1-11 mg/m<sup>3</sup> (1-10 ppm) in termini di AIC (Bocchio, 1992).

*Tabella 5 - Standard internazionali sugli ossidi di azoto e di carbonio.*

<i>Concentrazione massima ammissibile</i>	<i>Tempo di esposizione</i>	<i>Ente</i>
<i>Monossido di azoto (NO)</i>		
Nessuna raccomandazione		
<i>Biossido di azoto (NO<sub>2</sub>)</i>		
100 µg/m <sup>3</sup>	media annuale	EPA (USA)
100 µg/m <sup>3</sup>	media annuale	ASHRAE (USA)
100 µg/m <sup>3</sup> 480 µg/m <sup>3</sup>	media annuale 1 ora	Health & Welfare (Canada)
80-120 µg/m <sup>3</sup>	24 ore	Giappone
400 µg/m <sup>3</sup> 150 µg/m <sup>3</sup>	1 ora 24 ore	WHO
<i>Monossido di carbonio (CO)</i>		
10 mg/m <sup>3</sup> 40 mg/m <sup>3</sup>	8 ore 1 ora	EPA (USA)
10 mg/m <sup>3</sup> 40 mg/m <sup>3</sup>	8 ore 1 ora	ASHRAE (USA)
50 ppm	istantaneo	ACGIH (USA)
11 ppm 25 ppm	8 ore 1 ora	Health & Welfare (Canada)
10 mg/m <sup>3</sup>	8 ore	WHO
50 ppm	8 ore	OSHA

1 mg/m <sup>3</sup>	24 ore	Russia
<i>Biossido di carbonio (CO<sub>2</sub>)</i>		
4500 mg/m <sup>3</sup>	istantaneo	ASHRAE (USA)
5000 ppm	istantaneo	ACGIH/OSHA (USA)
6300 mg/m <sup>3</sup> 12600 mg/m <sup>3</sup>	media annuale istantaneo	Health & Welfare (Canada)
1000 ppm	istantaneo	Giappone
2500 ppm	istantaneo	National Board of Health (Finlandia)

Per quanto riguarda il biossido di azoto, i suoi livelli urbani esterni sono fortemente variabili, variando da 20 a 90 µg/m<sup>3</sup> (0.01-0.05 ppm), mentre i livelli di fondo naturale variano da 0.4 a 9.4 µg/m<sup>3</sup> (0.0002-0.005 ppm).

I livelli indoor invece, in presenza di apparecchi di combustione non ventilati possono superare i 200 µg/m<sup>3</sup> (0.1 ppm) (EEC, 1989b).

La concentrazione massima ammissibile per tale gas negli ambienti interni è di 3.8-9.4 mg/m<sup>3</sup> (2-5 ppm) in termini di MAC e di 100-400 µg/m<sup>3</sup> (0.05-0.2 ppm) in termini di AIC.

In tabella 5 (riadattata da materiale commerciale della *Cazzaniga s.p.a.*, 1994) sono riportati, per gli ossidi di carbonio e di azoto, i valori di concentrazione massima ammissibile stabiliti dai principali enti normativi internazionali.

#### *Misure preventive e di controllo dell'esposizione*

In generale i livelli di concentrazione indoor raggiunti dai prodotti di combustione possono essere ridotti adottando tecniche di rimozione o riduzione delle fonti o intervenendo sulla ventilazione.

La rimozione delle fonti inquinanti comporta l'eliminazione dello scarico diretto in ambiente.

La riduzione delle sorgenti prevede invece la sostituzione delle apparecchiature esistenti con altre meno inquinanti. A tal fine è necessario ottimizzare i processi di combustione, basandoli sull'utilizzo di tecniche di combustione "pulita", dotare gli apparecchi (soprattutto quelli per il riscaldamento di acqua calda ad uso domestico) di dispositivi di ventilazione e sicurezza e limitare l'uso di combustibili inquinanti.

E' importante inoltre dimensionare e realizzare correttamente i condotti di scarico, prevedendo aperture di alimentazione dell'aria di combustione, focolai stagni e l'adozione di dispositivi per il controllo delle condizioni di combustione e l'interruzione del processo in caso di anomalie di funzionamento. In proposito è stato stimato che le emissioni di CO ed NO<sub>x</sub> dagli apparecchi domestici possono ridursi di più del 75% a costi relativamente bassi.

Nei garage andrebbero sigillati tutti quei punti in cui si verificano perdite verso ambienti occupati.

Riguardo alla ventilazione va osservato come, in diversi paesi, i requisiti esistenti non abbiano dimostrato di fornire adeguata protezione dall'esposizione, neanche con aumenti dei tassi: la soluzione più appropriata si presenta piuttosto la riduzione delle emissioni, possibilmente associata ad una migliore ventilazione.

#### *4.2. FORMALDEIDE*



La formaldeide o aldeide formica (HCHO) fra i composti organici è l'aldeide più semplice e più comune. Essa si forma dalla combustione incompleta di molte sostanze organiche (anche di idrocarburi semplici come il metano), fra cui lo zucchero ed il legno.

A temperatura ambiente si presenta come un gas incolore, altamente reattivo, caratterizzato da un odore acuto molto irritante.

Il suo punto di fusione si trova a  $-92^{\circ}\text{C}$  ed il suo punto di ebollizione a  $-21^{\circ}\text{C}$ , per cui essa gassifica più o meno velocemente, liberandosi nell'aria in misura notevole, soprattutto dai materiali nuovi. Alcune sostanze presentano un "tempo di degasamento" limitato (meno di sei mesi dalla posa), altri composti più stabili liberano invece i gas con l'invecchiamento o eventuali rotture.

### *Sorgenti*

La formaldeide è presente nell'aria esterna, generandosi per fotoossidazione del metano e di altri composti organici naturali o antropogenici o ancora come prodotto metabolico delle piante.

Ulteriori contributi antropogenici al suo tasso di concentrazione nell'aria esterna provengono dai gas di scarico delle automobili, dai processi di combustione e dalle attività industriali, soprattutto dalla produzione di resine.

La formaldeide presente negli ambienti interni non-industriali proviene tuttavia solo in minima parte da fonti esterne, essendo la gran parte emessa da vari tipi di sorgenti interne.

L'emissione dovuta ai materiali si verifica maggiormente durante la prima fase di vita degli edifici ed è dovuta prevalentemente alle resine contenute in vari prodotti, soprattutto di legno, quali il truciolato contenente adesivi composti da resine di urea-formaldeide o isolanti di schiume della stessa sostanza.

Tuttavia, quasi tutti i prodotti da essa derivati sono in gran parte utilizzati negli ambienti interni (componenti dell'arredamento, tessuti, rivestimenti, prodotti di verniciatura, collanti, solventi, isolanti termici o acustici, ecc.) e costituiscono quindi possibili emettitori.

L'emissione viene favorita da aumenti di temperatura, dall'umidità e dal ricambio d'aria. Per tale ragione le concentrazioni più elevate si registrano nei mesi estivi.

Formaldeide è presente inoltre in larga misura nel fumo di tabacco: l'esposizione associata a tale tipo di sorgente è comparabile a quella dovuta ai materiali.

### *Applicazioni*

La formaldeide trova larga applicazione nell'industria, soprattutto per la fabbricazione di resine sintetiche, ma viene impiegata anche in conceria, in tintoria, nell'industria cartaria, tessile, per la produzione di disinfettanti e di insetticidi e di materiale fotografico.

### *Concentrazioni ed esposizione*

E' presente nella bassa atmosfera in concentrazioni molto basse: i suoi livelli naturali di fondo in esterno sono infatti dell'ordine di  $1\ \mu\text{g}/\text{m}^3$  (0.0008 ppm). In aree urbane i valori medi annuali si aggirano attorno ai  $5-10\ \mu\text{g}/\text{m}^3$  (0.004-0.008 ppm) ma, in situazioni particolari quali intenso traffico o periodi di smog, tale valore è accresciuto, nel breve periodo, di un ordine di grandezza; livelli ancora più elevati si riscontrano in vicinanza di stabilimenti ove hanno luogo processi industriali (EEC, 1990).

Per quanto riguarda gli ambienti interni, le concentrazioni osservate in edifici a destinazione non industriale si trovano generalmente al di sotto dei livelli di attenzione.

Le linee-guida emanate dall'*Organizzazione Mondiale della Sanità* sulla qualità dell'aria (WHO, 1987), contengono informazioni specifiche su tale sostanza, elaborate in seguito ad una

revisione della letteratura riguardante le relazioni fra livello di esposizione ed effetti sull'organismo. In base a tale fonte, la soglia di concentrazione da non superare per evitare irritazioni è molto bassa (0.1 mg/m<sup>3</sup>, pari a 0.08 ppm).

La concentrazione massima in ambienti chiusi è di 0.6-2.4 mg/m<sup>3</sup> (0.5-2 ppm) in termini di MAC e di 0.012-0.12 mg/m<sup>3</sup> (0.01-0.1 ppm) in termini di AIC.

La tabella 6, rielaborata da (EEC, 1990) e da materiale commerciale della *Cazzaniga s.p.a.* (1994), riporta i valori di concentrazione massima ammissibile stabiliti da alcuni enti normativi internazionali o proposti in alcuni paesi europei e negli USA. Tali valori guida sono compresi, nella maggior parte dei casi, fra 0.12 e 0.15 mg/m<sup>3</sup> (0.1-0.125 ppm) e solo alcuni di essi raggiungono o superano i 0.48 mg/m<sup>3</sup> (0.4 ppm). Tuttavia i valori riportati si riferiscono solo alle sorgenti più forti e più comuni, ossia quelle contenenti resine di urea-formaldeide.

#### *Effetti sulla salute*

L'esposizione alla formaldeide, se prolungata per lungo tempo, può dar luogo ad effetti nocivi, prevalentemente irritazioni, ma anche, per elevate concentrazioni, a lacrimazione, tosse, nausea e dispnea. Generalmente tali sintomi si attenuano con l'adattamento.

La soglia di concentrazione che provoca irritazioni è piuttosto bassa (0.1 mg/m<sup>3</sup>, pari a 0.08 ppm), ma tale disturbo diviene più acuto per valori compresi fra 0.3 ed 1 mg/m<sup>3</sup> (0.25 e 0.8 ppm) in soggetti particolarmente sensibili; per concentrazioni superiori ad 1.2 mg/m<sup>3</sup> (1 ppm) si verifica un rapido aumento delle sintomatologie. Concentrazioni di 35 mg/m<sup>3</sup> (circa 30 ppm) sono altamente tossiche, tuttavia già concentrazioni di 7.2-18 mg/m<sup>3</sup> (6-15 ppm) producono profonde ulcerazioni alle mucose (Bocchio, 1992).

La formaldeide è inoltre sospettata di cancerogenicità. Tuttavia le stime di rischio carcinogenico sono caratterizzate, al momento, da un'estrema incertezza, poichè la curva *dose-response* a livelli di esposizione molto elevati non è lineare; la situazione è talora ancora più complessa poichè tale non-linearità si protrae per l'intero range di esposizione.

Va osservato comunque come i livelli di concentrazione riscontrati nell'aria interna agli ambienti non industriali non risultino mai molto elevati, generalmente inferiori ai valori di soglia consigliati per non provocare discomfort o danni alla salute agli occupanti.

*Tabella 6 - Standard internazionali sulla formaldeide.*

<i>Nazione o Ente</i>	<i>Concentrazione massima ammissibile (mg/m<sup>3</sup>)</i>	<i>Note</i>
Canada	0.12 0.06	valore guida generale valore di prescrizione
Danimarca	0.15	valore guida per la popolazione in generale, basato sull'irritazione
Finlandia	0.15 0.30	valore guida per edifici costruiti dopo del 1981 valore guida per edifici costruiti prima del 1981
Francia		non esiste un valore guida generale o uno standard
Germania	0.12	valore guida per la popolazione in generale, basato sull'irritazione
Italia	0.12	valore guida di tentativo
Norvegia	0.06	valore guida raccomandato, ma non ancora adottato
Olanda	0.12	valore standard per la popolazione in generale e per i soggetti sensibili; irritazione e cancerogeneità

Regno Unito		non esiste un limite generale o uno standard
Spagna	0.48	solo per il periodo iniziale dopo l'applicazione di schiuma di UF
Svezia	0.12 0.84	nuove abitazioni vecchie abitazioni
Svizzera	0.24	valore limite
WHO (1987)	< 0.1	valore limite medio su 30 minuti per la popolazione in generale
USA	0.486	livello di prescrizione ambientale per il territorio federale
EPA (USA)	0.10	valore guida
ASHRAE (USA)	0.12	valore guida
OSHA (USA)	0.288	valore guida

### *Misure preventive e di controllo dell'esposizione*

Per impostare misure di prevenzione finalizzate a limitare gli effetti sulla salute causati dall'esposizione alla formaldeide negli ambienti interni è necessario considerare che:

1. l'emissione dipende dall'intensità della sorgente (tasso di emissione per unità di superficie), dalle sue dimensioni fisiche in relazione alla superficie emittente e dalle condizioni ambientali (temperatura ed umidità);
2. le concentrazioni nell'aria variano in dipendenza sia del tasso di emissione che di ventilazione;
3. l'esposizione dipende sia dalla concentrazione nell'ambiente che dal tempo di esposizione;
4. la reazione umana dipende dall'esposizione e dalla sensibilità individuale.

Pertanto, agendo su uno qualunque di questi fattori, si riduce l'effetto negativo sull'organismo umano.

Tuttavia la riduzione della sorgente è generalmente riconosciuta come la maniera più efficace di controllare l'esposizione. Pertanto l'uso di appropriati materiali a basso tasso di emissione e la definizione di opportune linee-guida atte a regolare sia la produzione, definendo i valori massimi consentiti per i tassi di emissione dei materiali, per unità di superficie e tempo, che la ventilazione, precisandone la capacità ed i relativi tassi, rappresentano l'approccio più corretto per affrontare il problema.

In seguito a ciò, negli ultimi 10-15 anni si è registrato un generale decremento nelle concentrazioni di formaldeide riscontrate, pur in presenza di un fattore antagonista, che è l'adozione di tassi di ventilazione minori per le misure di risparmio energetico o di isolamento acustico.

Infine, riguardo a tale gas vanno segnalati parecchi aspetti al momento ancora da affrontare. Fra di essi vanno citati:

- la mancanza di linee-guida comuni per le emissioni nei paesi europei;
- la mancanza di requisiti interconnessi per le emissioni/concentrazioni ed i tassi di ventilazione (le misure adottate per la riduzione delle emissioni non risultano efficaci se, in maniera indipendente, i tassi di ventilazione vengono ridotti);
- la scarsa conoscenza degli effetti cumulativi delle emissioni dovute a differenti sorgenti;
- l'esistenza di fasce di popolazione che manifestano disturbi anche in presenza di livelli di concentrazione inferiori ai valori di soglia (0.12 mg/m<sup>3</sup> o 0.1 ppm).

### 4.3. RADON

Il radon è un gas radioattivo incolore ed insapore derivato dal radio (elemento radioattivo abbastanza comune nella crosta terrestre) che appartiene al gruppo 0 della tavola periodica, quello dei gas nobili, aventi gli orbitali esterni completamente riempiti. Per tale stabilità nella propria configurazione elettronica, il radon è caratterizzato da una notevole inerzia chimica, per cui si diffonde nell'ambiente senza combinarsi con altri elementi per formare composti.

Esso deriva dal decadimento  $\alpha$  del Radio-226, che a sua volta si origina da successivi decadimenti dell'Uranio-235 e dell'Uranio-238, presenti in tracce nella crosta terrestre.

Se ne conoscono ventisei isotopi radioattivi, di cui tre naturali, tutti emittenti spontaneamente particelle  $\alpha$  (nuclei di elio), ossia il Radon-219 o *Actinon* (con tempo di dimezzamento  $t^{(2)}$  pari a 3.9 secondi), il Radon-220 o *Thoron* ( $t = 54$  secondi) ed il Radon-222 ( $t = 3.8$  giorni). Considerando che le varie specie di nuclidi conosciute hanno tempi di dimezzamento variabili da  $10^{-8}$  secondi a  $10^{10}$  anni, quelli del radon possono essere sicuramente considerati molto brevi. Esso si trasforma quindi rapidamente in una serie di discendenti, a loro volta radioattivi (isotopi del polonio, del piombo e del bismuto, fino al Piombo-206 è stabile), che pertanto costituiscono i maggiori responsabili delle dosi assorbite dalle persone che respirano aria contenente radon.

Fra i suoi isotopi il Radon-222 è quello presente in misura maggiore all'interno degli edifici. Tale isotopo è quello più pericoloso sia per la sua presenza quantitativamente più abbondante (in quanto deriva dall'Uranio-238, che rappresenta il 99.3% dell'uranio totale del pianeta), sia perchè come prodotti del suo decadimento si originano gli isotopi Po-218 e Po-214, molto più radioattivi del progenitore.

La figura 4 riporta lo schema di decadimento dell'Uranio-238, da cui si origina il Radon-222.

---

<sup>(2)</sup> Il tempo di dimezzamento di una sostanza radioattiva è il tempo necessario perchè il numero di nuclei radioattivi di cui essa è composta si dimezzi.

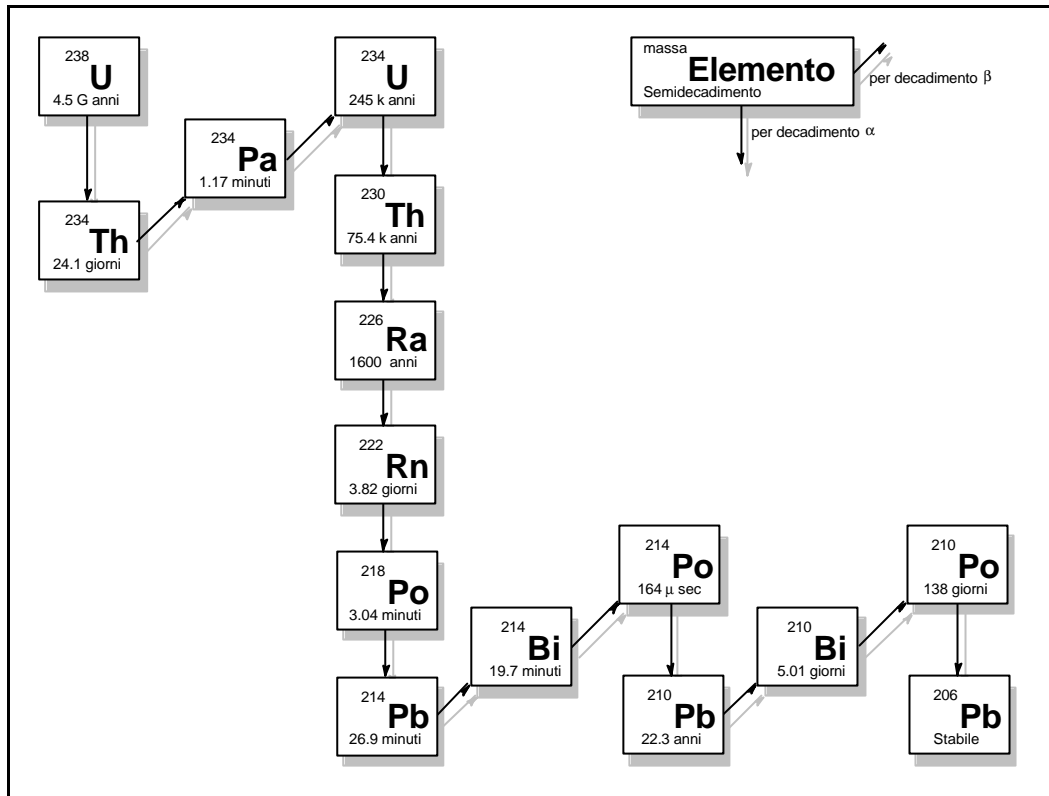


Figura 4 - Principali prodotti del decadimento dell'Uranio-238.

### Sorgenti

La presenza di radon all'interno degli edifici è dovuta sostanzialmente ad apporti derivanti dall'esterno e ad apporti dovuti a fonti interne all'edificio medesimo.

La sua principale fonte esterna è costituita dal gas del sottosuolo, che si origina dal terreno e dalle acque di falda. In esso il radon è presente in concentrazioni molto elevate ed in misura molto variabile, in dipendenza delle condizioni geologiche locali.

Nell'atmosfera libera il radon si disperde, ma se l'emissione verso l'atmosfera è impedita da costruzioni o edifici, una volta raggiunta la superficie terrestre si innestano fenomeni di trasporto dovuti a gradienti barici e termici o a fenomeni meteorologici quali vento e pioggia che ne favoriscono la diffusione all'interno degli edifici.

In genere il gas penetra per infiltrazione attraverso crepe nelle strutture vicine alle fondamenta, cavi o tubazioni e fuoriesce dalle parti alte, soprattutto dal tetto.

Il tasso di ingresso negli edifici dipende dalla permeabilità del suolo ai flussi d'aria, da fattori geologici (i terreni a maggior tasso di emissione sono quelli silicei), meteorologici e strutturali. Inoltre in uno stesso luogo esso presenta variazioni sia nell'arco della giornata che con l'avvicinarsi delle stagioni.

Gli apporti interni sono dovuti invece all'emissione dei materiali costruttivi dell'edificio: le concentrazioni derivate dall'attività radioattiva di tali materiali sono tuttavia molto inferiori a quelle associate alla presenza di gas infiltrato dal sottosuolo.

Nella tabella 7 (tratta da Patania, 1995) è riportato il contenuto in radon di alcune rocce comuni e di alcuni materiali da costruzione.

Sono, infine, ancora da considerarsi apporti interni le emissioni provenienti dall'acqua usata per i servizi e per le normali pratiche igienico-sanitarie.

La forma chimica e la concentrazione nell'aria interna dipendono dal tasso d'ingresso, dalla quantità di particelle presenti in sospensione e dall'andamento dei flussi d'aria nell'edificio.

La variabilità nei tassi d'ingresso e di ventilazione e nelle velocità di reazione, pertanto, fa sì che le loro concentrazioni possano differire notevolmente nelle diverse situazioni: l'estrema variabilità rappresenta infatti la principale caratteristica dei livelli di radon indoor rispetto ad altre forme di radiazione naturali. In particolare, in alcune zone della terra si riscontrano abitazioni in cui i livelli registrati sono anche di un ordine di grandezza superiori a quelli medi.

*Tabella 7 - Contenuto di radio di alcune rocce comuni e di alcuni materiali da costruzione.*

<i>Materiale</i>	<i>Concentrazione di radio (pCi/kg)</i>
Cemento	270-1350
Calcestruzzo	270-2160
Calcestruzzo con scisto alluminifero	8101-67567
Mattoni	540-5405
Granito	2700-5405
Gesso (naturale)	135-540
Gesso (pannelli)	13510-54050
Tufo	2700-16216
Ceneri volanti	1350-8108

### *Effetti sulla salute*

Tutte le sostanze esaminate sono tossiche sia dal punto di vista chimico (per inalazione) che da quello radiativo (per esposizione). Fra di esse, i radionuclidi più pericolosi per l'uomo sono quelli a vita media molto breve, in quanto emettono enormi quantità di radiazioni in tempi brevissimi. In particolare il Radon-222 ed i suoi discendenti sono ritenuti la causa principale di esposizione a radiazione ionizzante per un individuo medio.

La presenza di radioattività in generale è causa di effetti patogeni alle zone bronco-polmonari ed in particolare favorirebbe l'insorgere del cancro alla gola ed alle parti alte del sistema bronchiale.

L'azione cancerogena è stata constatata, in particolare, per alcune fasce di lavoratori più esposte, quali i minatori, anche se l'esposizione media risulta elevata anche all'interno degli ambienti residenziali, solo di un'ordine di grandezza inferiore di quella riscontrata per il caso dei minatori.

Tuttavia, in mancanza di casistiche complete, il rapporto fra concentrazioni, tempi di esposizione ed effetti riscontrati necessita di ulteriori approfondimenti: per tale ragione il radon figura attualmente fra gli inquinanti indoor più studiati.

### *Concentrazioni ed esposizione*

I livelli di concentrazione riscontrati negli interni sono spesso elevati per la presenza di spazi ristretti, che causano una miscelazione ridotta: recenti indagini in vari paesi della Comunità Europea hanno fornito valori di concentrazione medi variabili da 20 a 50 Bq/m<sup>3</sup>, solo di un'ordine di grandezza inferiori rispetto a quelli riscontrati in esterno.

Si è stimato inoltre che un'esposizione di 2 mSv/anno tiene conto di circa l'80% della dose effettiva equivalente media ricevuta annualmente dalla popolazione appartenente agli Stati membri della Comunità Europea (EEC, 1988).

I livelli raggiunti fanno sì che la dose di radiazioni assorbite dall'organismo umano sia circa tre volte maggiore della dose che la gran parte delle persone riceve nel corso della propria vita in seguito alle esposizioni a radiazioni X e ad altri trattamenti medici (Nero, 1988).

Tuttavia, in base a quanto detto in precedenza, l'esposizione di un individuo a tali sostanze dipende fortemente dalla natura geologica della regione, dalla tipologia dell'edificio e dalla provenienza dei materiali da costruzione impiegati; essa risulta ovviamente maggiore per gli abitanti in abitazioni semiinterrate.

#### *Misure preventive e di controllo dell'esposizione*

Nell'ambito della Comunità Europea il problema del controllo delle concentrazioni di radon negli interni è stato recentemente oggetto di particolari studi, dai quali è emersa l'esigenza di definire due diversi livelli di soglia: un *livello di riferimento* cui riferirsi per azioni di bonifica (dovrebbe essere una dose effettiva equivalente di 20 mSv/anno o, per scopi pratici, un livello derivato per la concentrazione di radon, pari a 400 Bq/m<sup>3</sup>) ed un *livello di progetto* (dovrebbe essere di 10 mSv/anno o 200Bq/m<sup>3</sup>) per le future abitazioni.

#### **4.4. COMPOSTI ORGANICI VOLATILI**

Negli ambienti chiusi tali sostanze sono generate principalmente da materiali edili, isolanti, arredi, rivestimenti, e simili e possono consistere di centinaia di composti diversi. Anche molti materiali naturali ed i prodotti per l'igiene personale e della casa emettono VOC.

Le persone, infine, immettono VOC nell'ambiente (ad eccezione della formaldeide) come bioeffluenti o attraverso il fumo di tabacco.

Tali sostanze hanno punti di fusione che si trovano al di sotto della temperatura ambiente e punti di ebollizione variabili dai 50°C ai 260°C.

La complessa composizione dei VOC presenti in un ambiente interno ne rende generalmente complessa l'analisi e, conseguentemente, le stime di rischio dovuto al loro effetto totale sugli esseri umani.

In tabella 8 sono riportati i principali composti organici volatili rilevati nell'aria di un ambiente confinato, con le rispettive concentrazioni massime raccomandate dall'ASHRAE per il comfort.

Fra di essi il benzene è un idrocarburo aromatico molto tossico. La presenza prolungata in ambienti contenenti vapori di benzene può provocare anche anemia o leucemia.

Lo stirene è un composto organico liquido, derivato dal benzene. E' una materia prima per la produzione di materie plastiche come il polistirolo o di gomme sintetiche.

Il toluene è un idrocarburo aromatico liquido utilizzato come solvente per le vernici, i cui vapori sono tossici, anche se in misura minore di quelli del benzene.

I refrigeranti sono sostanze utilizzate negli impianti di raffreddamento.

L'acetone è un liquido volatile ed infiammabile di odore caratteristico. E' uno dei solventi commerciali più diffusi, e come tale trova largo impiego nell'industria delle vernici oltre che delle fibre artificiali.

*Tabella 8 - Concentrazioni massime ammissibili per i principali composti organici volatili raccomandate dall'ASHRAE 62-89 per il raggiungimento del comfort.*

<i>Composto</i>	<i>Concentrazione massima raccomandata (ppm)</i>
Benzene	1
Diossano	2.5
Stirene	5
Cloruro di metilene	10
Toluene	10
Refrigeranti	50 (eccetto R 123)
Acetone	75

Nelle direttive europee sulla qualità dell'aria interna (EEC, 1992) vengono riportati due differenti approcci utilizzati nella formulazione di linee-guida per tali sostanze (escludendo la formaldeide e quelli aventi carattere cancerogeno), il primo dei quali si riferisce al livello dei VOC totali (TVOC) (Mølhave, 1990) ed il secondo è invece basato su tecniche di separazione e quantificazione gas-cromatografiche (vedi cap. 6) (Seifert, 1990).

In particolare il primo approccio viene desunto da quanto pubblicato in letteratura sulle reazioni tossicologiche e propone per il livello dei VOC totali la classificazione del range di esposizione riportata in tabella 9; in base al secondo approccio, invece, i composti vengono raggruppati in base alla concentrazione e suddivisi nelle classi riportate in tabella 10, per ognuna delle quali viene fornito un valore consigliato che si riferisce ai primi dieci della classe. I valori relativi alle diverse classi vengono quindi sommati per ottenere il valore dei VOC totali. Il valore di target proposto per i TVOC è 300  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ; inoltre nessun singolo composto dovrebbe in ogni caso superare il 10% di tale valore o il 50% del target della sua classe.

*Tabella 9 - Classificazione del range di esposizione dei VOC totali in base ai livelli di concentrazione.*

<i>Range</i>	<i>Concentrazione(mg/m<sup>3</sup>)</i>
di comfort	< 200
di esposizione multifattoriale	200-300
di discomfort	3000-25000
tossico	> 25000

*Tabella 10 - Valori guida per i VOC.*

<i>Composto</i>	<i>Valore guida (ng/m<sup>3</sup>)</i>
Alcani	100
Aromatici	50
Terpeni	30
Idrocarburi alogenati	40
Esteri	20
Carbonili (formaldeide esclusa)	20
Altri	50

Tali valori di prescrizione non sono basati su considerazioni di tipo tossicologico, ma sui livelli esistenti e su giudizi professionali in merito ai livelli raggiungibili.

I due approcci, sebbene molto diversi, forniscono praticamente risultati identici.

Recentemente il livello dei VOC totali è stato proposto come indicatore sia di condizioni di comfort che di salubrità.



#### 4.5. GAS METABOLICI

I processi metabolici degli occupanti di un ambiente richiedono ossigeno e producono i cosiddetti *bioeffluenti*, composti da anidride carbonica, umidità, aldeidi, esteri ed alcoli: fra di essi quello prodotto in misura maggiore è di gran lunga la CO<sub>2</sub>.

Altri tipi di gas metabolici in pratica non raggiungono mai concentrazioni nocive, ma presentano un odore sgradevole che richiede tassi di ventilazione più elevati di quelli necessari per l'anidride carbonica.

#### 4.6. ANIDRIDE CARBONICA

Gli esseri umani producono anidride carbonica in misura proporzionale alla velocità del loro metabolismo. Fra i gas metabolici tale composto è quello quantitativamente più abbondante: per tale ragione e per il suo caratteristico odore sgradevole essa viene da più di un secolo utilizzata come indicatore dell'inquinamento provocato dalle persone sedentarie ed, in generale, anche della concentrazione di altri bioeffluenti umani.

Inoltre, negli ultimi anni la concentrazione di CO<sub>2</sub> è divenuta sempre più un parametro fondamentale adottato nelle indagini di qualità dell'aria: soprattutto in ambienti ad elevato tasso di occupazione, quali teatri, auditorium, ecc., essa viene generalmente utilizzata per controllare gli apporti di aria esterna (valutando la percentuale di aria immessa dai sistemi di condizionamento), il suo grado di miscelazione con l'aria interna ed, in generale, le prestazioni dei sistemi di trattamento dell'aria.

Nel complesso, quindi, la concentrazione di CO<sub>2</sub> viene utilizzata come indicatore surrogato della ventilazione in relazione alle valutazioni di adeguatezza della diluizione degli inquinanti prodotti dagli occupanti, e come parametro di controllo dei tassi.

In particolare, secondo la norma ASHRAE 62-1989 (ASHRAE, 1989), la relazione fra la concentrazione di CO<sub>2</sub> e l'apporto di aria esterna è dato dalla seguente espressione:

$$Q = \frac{N}{C_s - C_o} \quad (2.1),$$

in cui Q rappresenta il tasso di ventilazione per occupante, N il tasso di produzione di CO<sub>2</sub> per persona e C<sub>s</sub> e C<sub>o</sub> la sua concentrazione rispettivamente nell'ambiente interno ed esterno.

Tuttavia la CO<sub>2</sub>, non fornendo indicazioni sulle sorgenti che non la producono e, soprattutto, sugli inquinanti pericolosi e non percepibili come il monossido di carbonio, il radon, ecc., non si rivela del tutto adatta come indice generale di qualità dell'aria.

La sua normale concentrazione nell'atmosfera è di circa 350 ppm (630 mg/m<sup>3</sup>), anche se tale valore è in tendenziale crescita. La massima concentrazione ammissibile in ambienti chiusi è di 5000 ppm (9 g/m<sup>3</sup>) in termini di MAC e di 1000-2500 ppm (1.8-4.5 g/m<sup>3</sup>) in termini di AIC.

Lo standard ASHRAE 62 raccomanda tuttavia, per garantire il comfort in relazione agli odori corporali, di non superare le 1000 ppm, che corrispondono a 8 l/s per persona per uno standard occupazionale di 7 persone su 89 m<sup>2</sup>. Tale limite viene fissato in base solo alla sua associazione con l'odore corporeo e non con gli effetti dell'anidride carbonica stessa sulla salute o sul comfort e si basa su una concentrazione esterna di 300 ppm (indirettamente questa associazione è fra il tasso di

ventilazione per persona e la velocità con cui una persona produce sostanze odorose): in generale, comunque, nella norma tale valore di ventilazione viene raccomandato come valore minimo da adottare per la gran parte degli ambienti occupati.

Infatti superando il livello di 600 ppm (circa 1 g/m<sup>3</sup>) gli insoddisfatti crescono significativamente (la percentuale di insoddisfatti in funzione della concentrazione di anidride carbonica in ambienti in cui le uniche sorgenti inquinanti sono rappresentate dagli occupanti è stata riportata in figura 1): pertanto, se i livelli riscontrati superano le 800 ppm (1.44 g/m<sup>3</sup>) è consigliabile controllare i tassi di immissione dell'aria esterna.

Per evitare problemi alla salute la concentrazione in ambienti chiusi non dovrebbe superare le 3500 ppm (6.3 g/m<sup>3</sup>), tuttavia in concentrazioni inferiori a 5000 ppm la CO<sub>2</sub> non è dannosa per l'uomo; concentrazioni superiori a 10000 ppm (18 g/m<sup>3</sup>) provocano invece malesseri reversibili, mentre concentrazioni superiori a 40000 ppm (72 g/m<sup>3</sup>) risultano tossiche (Bocchio, 1992).

Le concentrazioni che tipicamente si riscontrano in ambienti chiusi sono basse, per cui il livello di sicurezza si riesce a mantenere adottando tassi di ventilazione molto ridotti. Pertanto, nella pratica, per le basse concentrazioni che si registrano, l'anidride carbonica risulta innocua e non viene percepita dagli esseri umani.

#### *4.7. FUMO DI TABACCO (ETS)*

Il fumo di tabacco è uno degli inquinanti più nocivi riscontrati con maggiore frequenza negli interni.

Esso è composto da diverse migliaia di composti chimici gassosi, potenzialmente tossici (tra i quali monossido di carbonio, anidride carbonica, nicotina, ossidi di azoto, aldeidi, benzopirene, nitrosamine volatili, ecc.), da particolato solido respirabile ed altri contaminanti organici.

I residui della combustione del tabacco presentano la peculiarità di depositarsi sulla frazione più minuta delle polveri, che non viene ritenuta dai sacchetti dell'aspirapolvere, ma anzi viene rimessa in circolo.

Queste particelle hanno una lunga permanenza nell'atmosfera ed un'azione tossica connessa alla possibilità di essere inalate nelle vie respiratorie profonde (alveoli bronchiali): in particolare, alcune di esse sono inspirabili e penetrano nei tratti respiratori più bassi (particelle sospese respirabili, RPS) mentre altre si depositano nei tratti respiratori superiori (particelle sospese non respirabili, NRPS).

All'ETS è stato attribuito un ampio spettro di effetti dannosi per la salute, sia a corto che a lungo termine, quali irritazioni, allergie, disturbi cardiovascolari, sindromi asmatiche, cancro del polmone ed altri disturbi cronici dell'apparato respiratorio.

#### *4.8. MICROORGANISMI*

I microorganismi sono in gran parte generati dagli esseri umani (molti batteri e virus), ma si producono anche su superfici umide, in alcuni materiali edili e nei sistemi idrici o umidificatori non soggetti ad appropriata manutenzione.

Quelli più pericolosi sono rappresentati dai batteri, i virus ed i funghi.

Essi possono essere controllati intervenendo sulle condizioni termoigrometriche e sulle abitudini igieniche.

#### *4.9. VAPOR D'ACQUA - UMIDITA'*

L'eccesso di vapor d'acqua (e quindi di umidità) all'interno degli ambienti confinati è determinato prevalentemente dagli occupanti e dagli apparecchi di combustione che funzionano in assenza di un'adeguata ventilazione.

I problemi principali che possono originarsi sono costituiti dal proliferare dei microorganismi (che, soprattutto in presenza di polveri, possono provocare disturbi) e dalla formazione di condense e muffe.

Un elevato tasso di umidità in ambienti chiusi favorisce inoltre l'emissione da parte di alcuni materiali di sostanze chimiche, fra cui la formaldeide.

In condizioni di benessere l'umidità specifica non deve superare il valore di 11.5 g<sub>acqua</sub>/kg<sub>aria secca</sub>, mentre l'umidità relativa non deve superare il 60-65%. Parimenti quest'ultima non deve essere inferiore al 30%.

Tuttavia valori di umidità compresi fra tali limiti non necessariamente garantiscono l'assenza di problemi di umidità nell'edificio: infatti i valori rilevati per l'aria non sempre eguagliano quelli relativi alle pareti, ai soffitti ed ai pavimenti dello stesso ambiente. In alcuni casi può quindi essere necessario isolare l'edificio per mezzo di opportune barriere al vapore.

#### *4.10. GAS EMESSO DAL MATERIALE DA DIPORTO E DALLE DISCARICHE*

Negli edifici ubicati in vicinanza di discariche, un fattore che ne peggiora la qualità dell'aria interna è il gas emesso dal materiale da diporto che penetra all'interno degli ambienti per infiltrazione attraverso crepe o intorno alle aperture.

Tale gas è generato dall'azione di microorganismi sul materiale organico di rifiuto presente nelle discariche e contiene numerose sostanze chimiche potenzialmente nocive.

Esso è composto in gran parte da metano ed anidride carbonica, ma in taluni casi anche da idrogeno ed idrogeno solforato. Una quantità inferiore all'1% è costituita da composti organici volatili, fra i quali più di 100 sono stati trovati in tracce (idrocarburi alifatici ed aromatici, alcoli, esteri ed altri composti organo-solforati): per la loro bassa concentrazione, tuttavia tali composti non presentano elevati tassi di tossicità, ma risultano fastidiosi all'olfatto.

#### *4.11. AMIANTO*

Con tale nome si indicano comunemente molti silicati che si presentano in forma fibrosa e vengono riconosciuti come agenti cancerogeni.

Per la sua resistenza agli acidi ed al fuoco e la sua bassa conducibilità termica, l'amianto veniva impiegato, da solo o con altri materiali aventi proprietà simili, in manufatti soggetti ad elevate temperature o costituenti schermi di protezione termica.

Sono di amianto i materiali utilizzati in edifici di costruzione non recente, come alcuni pannelli isolanti ed il fibrocemento: essi tuttavia non sono più utilizzati poichè ne emettono nell'ambiente fibre microscopiche.

## CAPITOLO III: NORMATIVE IN MATERIA DI VENTILAZIONE

I risvolti dell'inquinamento indoor sono diversi, ad esempio sanitari o riguardanti il *comfort* delle persone, e pertanto l'attenzione dei diversi tecnici che affrontano il problema risulta focalizzata su aspetti diversi.

In particolare, l'approccio medico mira prevalentemente all'individuazione degli effetti sull'uomo in relazione alla concentrazione ed al tempo di esposizione.

L'approccio ingegneristico, invece, mira anche al raggiungimento del comfort, prendendo in considerazione il giudizio formulato dagli occupanti in merito alla loro percezione della qualità dell'aria respirata.

L'esistenza di diversi punti di vista è ben recepita dalle più importanti normative che, nel definire le procedure operative per la valutazione dei requisiti atti a garantire le condizioni di accettabilità per gli occupanti, affrontano il duplice aspetto del problema.

In particolare, come già accennato in precedenza, lo standard ASHRAE-62 1989 fornisce un'appropriata definizione di "qualità accettabile dell'aria interna", che contiene sia il risvolto sanitario che quello di comfort: *"aria in cui non siano presenti contaminanti conosciuti in concentrazioni pericolose, secondo quanto stabilito dalle autorità competenti, e rispetto alla quale la grande maggioranza (80% o più) delle persone esposte non esprime insoddisfazione"*.

Inoltre le linee-guida emanate nell'ambito di un'azione concertata europea (EEC, 1992) ed il nuovo progetto di standard del CEN (CEN, 1994) contengono procedure di calcolo per i tassi di ventilazione che tengono conto di entrambi gli aspetti citati.

Tuttavia, a differenza di quanto accade per le condizioni di benessere termoigrometrico, per il cui raggiungimento i requisiti risultano più restrittivi e, se soddisfatti, verificano contemporaneamente anche quelli necessari per la tutela della salute, per quanto riguarda la qualità dell'aria la verifica delle condizioni di comfort non è sufficiente a minimizzare i rischi per la salute. Esistono infatti sostanze inquinanti che, per quanto nocive, non vengono percepite dai sensori umani. In quest'ottica la qualità percepita dell'aria non si presenta quindi come strumento sicuro per rilevare eventuali effetti dannosi alla salute.

Inoltre si è constatato come, seppure i livelli di concentrazione riscontrati in ambienti ventilati in condizioni di benessere risultino di diversi ordini di grandezza inferiori ai valori limite, esiste lo stesso una rilevante percentuale di occupanti che accusa fastidi, disturbi e malesseri.

Pertanto la tendenza più recente in campo normativo (EEC, 1991; CEN, 1994) è quella di differenziare le procedure per il calcolo dei tassi di ventilazione in base ai diversi obiettivi prefissati (comfort o salute), adottando quindi per i suddetti tassi valori cautelativi, capaci di garantire il contemporaneo soddisfacimento sia delle condizioni di salubrità che di quelle di comfort.

### 1. Principali Enti e Normative

E' noto come, a livello internazionale, gli enti normativi più importanti siano l'ISO (*International Organization for Standardization*), il CEN (*European Committee for*

Standardization) e l'ANSI (American National Standard Institute) che, nel campo specifico del condizionamento dell'aria, adotta standard ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Systems).

Il CEN e l'ISO hanno strutture simili, che si articolano in Comitati Tecnici (TC), sottocomitati (SC) e gruppi di lavoro (WG). La figura 6 mostra uno schema della loro organizzazione, con riferimento ad alcuni progetti di norma relativi a qualità ambientale interna (Olesen, 1993).

In particolare, sul tema della *Ventilazione e Condizionamento dell'aria* il CEN ha attivato, dalla fine degli anni '80, un comitato tecnico (TC 156) che comprende nove gruppi di lavoro (WG), alcuni dei quali (WG 2, 3, 4, 5, 9) si occupano essenzialmente di componentistica dell'impianto, mentre altri (WG 6, 7, 8) sono più orientati alla progettazione, alla costruzione ed all'esercizio degli impianti.

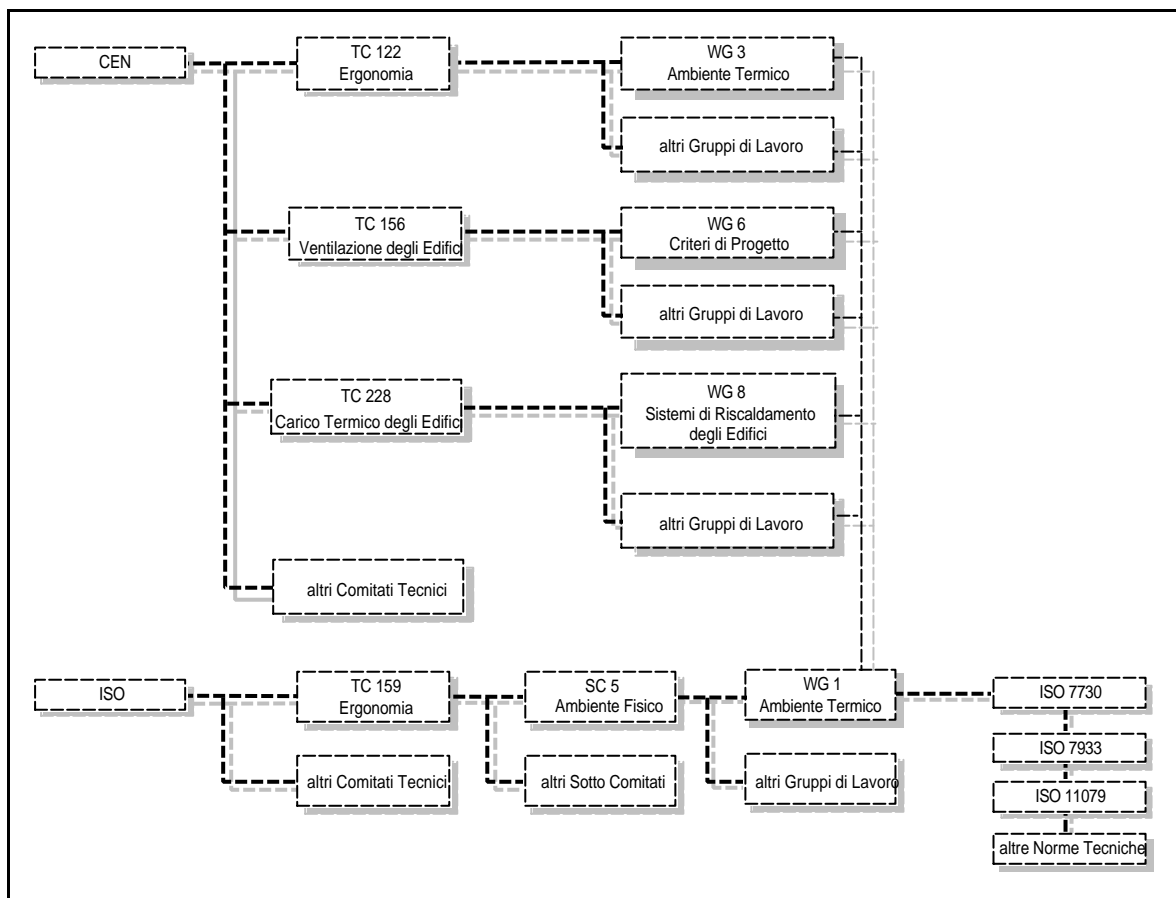


Figura 6 - Schema esemplificativo della struttura organizzativa del CEN e dell'ISO.

Mentre gli standard ISO e, fino ad oggi, anche quelli ASHRAE non sono ingiuntivi, le norme CEN vanno rispettate in tutti i paesi europei, e spesso sostituiscono i corrispondenti standard nazionali. Tuttavia il CEN quando è possibile tenta di utilizzare come base per produrre nuovi standard norme ISO già esistenti.

Importanti sono, inoltre, alcuni enti normativi aventi carattere nazionale, quali il *Deutsches Institut für Normung* (DIN), ed alcune organizzazioni internazionali, quali la *Commission of the European Communities* (EEC), il *Nordic Committee on Building Regulation* (NKB), la

*Federation of Scandinavian HVAC Societies (SCANVAC)* e la *World Health Organization (WHO)*.

In materia di ventilazione e qualità dell'aria interna, al momento lo standard più importante è rappresentato dalla normativa ANSI/ASHRAE 62-1989 "*Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality*" (ASHRAE, 1989), che è attualmente in stato di revisione.

Inoltre, al CEN è in fase di elaborazione uno standard dal titolo "*Ventilation requirements in buildings*", il cui stato dell'arte (unitamente ad alcune informazioni sugli sviluppi della revisione ASHRAE) è riportato nel rapporto n. 11 dell'EEC, COST Project 613 (EEC, 1992), oltre che nella pubblicazione n. 61E dell'NKB (NKB, 1991) e nelle linee-guida emanate dallo SCANVAC (1991).

Esso rappresenta il primo di una serie di standard riguardanti la ventilazione naturale e meccanica degli edifici ed è stato concepito come strumento flessibile di supporto al progettista chiamato a realizzare condizioni di comfort negli ambienti interni.

Seppur recente, tale progetto è già stato rivisto e la nuova bozza di normativa, dal titolo "*Ventilation for Buildings - Design criteria for the indoor environment*" (CEN prEN 1752), prodotta dal WG 6, è stata distribuita nel dicembre 1994 (CEN, 1994).

Essa riprende sostanzialmente le indicazioni presenti nelle citate linee guida EEC in materia di qualità dell'aria, ampliandone i contenuti alla luce delle teorie di Fanger sul benessere termoisometrico e formulando pertanto una proposta contenente una visione più generale della progettazione del comfort ambientale, che riguarda gli aspetti termoisometrici, acustici e di qualità dell'aria.

Tale bozza di norma rappresenta quanto di più recente emanato in materia di qualità dell'aria.

Riguardando la situazione italiana, si constata invece la carenza di norme atte a regolare in maniera organica la ventilazione, con riferimento sia al comfort che all'igiene ambientale (ma anche la sicurezza e l'efficienza energetica sono regolamentate in maniera incompleta). Solo per alcuni settori particolari di maggiore tutela (scuole, ospedali, ecc.) gli aspetti della salubrità e del comfort sono regolamentati in maniera unitaria, ma le disposizioni ad essi relative (emanate per lo più negli anni '70) si presentano piuttosto inadeguate, specie se rapportate ai livelli di conoscenze attuali in materia di IAQ.

Il riferimento normativo più recente è rappresentato dal progetto di norma del Sottocomitato 5 del CTI (che da poco è diventata norma UNI 10399) "*Impianti aerulici a fini di benessere. Generalità, classificazioni e requisiti. Regole per la richiesta d'offerta, l'offerta, l'ordine, la fornitura*", che contiene prescrizioni sulle portate d'aria esterna e di estrazione, sulla filtrazione e sui movimenti dell'aria nelle zone di occupazione.

Oltre a tale progetto, esistono solo alcune disposizioni obbligatorie sul risparmio energetico e sulla sicurezza degli impianti che coinvolgono aspetti della ventilazione.

### *1.1. Lo Standard ASHRAE 62-1989*

La norma prevede due possibili procedure per la valutazione dei requisiti di ventilazione, entrambe basate sull'approccio tradizionale della diluizione degli inquinanti tramite aria di ricambio esterna, che si differenziano per i diversi approcci utilizzati per la determinazione dei tassi:

- procedura *Ventilation Rate*;
- procedura *Indoor Air Quality*.

La prima procedura prevede che la qualità dell'aria desiderata in un ambiente venga ottenuta immettendovi aria ventilata con determinate caratteristiche qualitative e quantitative.

La seconda prevede invece che lo stesso obiettivo venga raggiunto tramite monitoraggio dell'aria, controllando le concentrazioni di prefissate sostanze inquinanti.

In particolare, la procedura *Ventilation Rate* specifica, basandosi sul livello di occupazione, la quantità di aria esterna (espressa in l/s per persona o, talvolta, in l/s per m<sup>2</sup>) sufficiente a diluire, per i diversi tipi di ambienti, le concentrazioni di inquinanti presenti ad un livello tale da non essere più pericolosa nè causa di discomfort per gli occupanti.

Per le varie destinazioni d'uso dell'edificio vengono pertanto stabiliti, in relazione alle varie tipologie d'impianto, tassi minimi di ventilazione, nonchè valori delle portate di ricambio.

I requisiti minimi prevedono, per i ricambi d'aria, valori di 7.5 l/s per persona negli edifici residenziali e di 10 l/s per persona negli edifici commerciali. In particolare il valore di base, 7.5 l/s per persona, è dedotto da studi di percezione di odori corporali (Cain et al., 1983; Fanger and Berg-Munch, 1983).

Adottando questo tasso di ventilazione, ci si aspetta che l'80% dei visitatori, appena entrati nell'ambiente, esprima soddisfazione per la qualità dell'aria riscontrata.

La procedura *indoor air quality* è fondata invece sul controllo di specifici inquinanti, per i quali si presuppongono noti i relativi tassi di emissione da parte dell'edificio.

Essa ha per obiettivo la determinazione della quantità di aria esterna sufficiente a diluire quella interna fino a raggiungere livelli di concentrazione, per prefissati inquinanti, inferiori ai limiti imposti.

Osserviamo, in particolare, come quest'ultima procedura non ponga vincoli alla soluzione impiantistica da prescegliere per ottenere la qualità desiderata, che può pertanto realizzarsi tramite diluizione dell'aria esterna o per mezzo del trattamento dell'aria di ricircolo con processi di depurazione, ecc.

Una sua efficace applicazione necessita tuttavia a corredo di una cospicua dotazione di tabelle contenenti informazioni, al momento non facilmente reperibili, sui vari inquinanti presenti negli ambienti interni, con le concentrazioni limite ed i tassi di emissione relativi ai vari materiali presenti. Lo stesso standard riporta dati solo in relazione ad alcuni degli inquinanti più comuni (quali ad esempio l'anidride carbonica, il vapor d'acqua, il biossido di azoto e l'ozono) rimandando, per gli altri (radon, prodotti di combustione, fumo da tabacco, formaldeide, composti organici volatili, microorganismi, particolato, ecc.) a documentazione tecnica di altra fonte (WHO, 1987). Questa scarsa disponibilità di dati rappresenta il limite attuale della procedura, che ne rende di difficile attuazione l'applicazione diffusa.

Per tale ragione quello adottato nella *Ventilation rate* rappresenta, al momento, il criterio più diffusamente adoperato: si è stimato che il 95% circa degli impianti di climatizzazione ambientale (sistemi di riscaldamento, ventilazione meccanica e condizionamento dell'aria) venga infatti dimensionato secondo queste specifiche (Olesen, 1993).

Esso tuttavia, prescrivendo solo opportuni tassi di ventilazione, fornisce solo una soluzione indiretta, seppur immediata, al controllo dei contaminanti presenti nell'aria interna; l'approccio della procedura *Indoor air quality* è invece più diretto ed ha carattere quantitativo.

In particolare, la procedura *Ventilation rate* risulta di maggiore utilità in caso di risistemazione degli spazi, per introduzione di eventuali sorgenti inquinanti non note, la *Indoor air quality* in caso di presenza di contaminanti già nota in fase di progetto.

Entrambe le procedure, come si è detto, sono attualmente in stato di revisione, e sono state ampiamente esaminate ed applicate dagli operatori di campo e fatte oggetto di approfondite analisi, anche critiche (Tucker, 1992).

## 1.2. Linee-guida europee e proposta di norma CEN

Per superare il problema della difficile attuazione delle norme ASHRAE qualche anno fa sono state messe a punto, nell'ambito di un'azione concertata europea, alcune linee-guida concernenti i requisiti di ventilazione negli edifici (EEC, 1992) che costituiscono in pratica un'estensione della procedura *Indoor Air Quality* dello standard ASHRAE, contenendo gli sviluppi critici maturati nella revisione della norma.

Esse riportano inoltre l'embrione del progetto del nuovo standard del CEN (già rivisto, come anticipato, dal WG6 del comitato tecnico che si occupa di ventilazione) e si riferiscono, in particolare, alla determinazione dei tassi di ventilazione per gli edifici non industriali.

La metodologia proposta nel documento è basata principalmente sugli studi condotti da Fanger per quantificare l'inquinamento dell'aria negli ambienti interni in relazione alla sua percezione da parte degli esseri umani, e sull'utilizzo dell'ormai nota teoria degli *olf* e *decipol* (Fanger, 1988; Fanger et al., 1988).

I concetti fondamentali espressi possono essere così riassunti:

- il tasso di ventilazione, in assenza di inquinanti pericolosi per la salute, è basato sulla percezione olfattiva delle persone;
- tale percezione può esprimersi per mezzo di un unico indicatore di intensità per tutte le fonti (il *decipol*);
- il tasso di emissione di sostanze inquinanti da parte delle varie sorgenti può essere espresso per mezzo di un carico inquinante equivalente (l'*olf*);
- la percezione olfattiva e la percentuale di persone insoddisfatte della qualità dell'ambiente sono legate da una relazione biunivoca.

Come già accennato, vengono proposte due distinte procedure, che consentono rispettivamente di determinare il tasso necessario per il raggiungimento del comfort e quello richiesto per minimizzare il potenziale di rischio di effetti indesiderati sulla salute. Una volta determinati i due tassi in sede progettuale viene adottato come tasso di ventilazione per l'edificio il valore massimo fra i due.

Per tale novità procedurale la metodologia proposta nelle linee-guida europee viene considerata diffusamente come il superamento di quella adottata dall'ASHRAE.

Tale impostazione teorica viene pertanto interamente mantenuta nella bozza di norma prodotta in seguito alla sua revisione che, come già anticipato, senza alterare lo spirito originario delle linee-guida, amplia la visione progettuale del comfort ambientale, introducendo nelle valutazioni di qualità degli ambienti ulteriori aspetti, relativi al benessere termoisometrico ed acustico.

## 2. Confronto fra standard differenti



In conclusione è interessante riportare un confronto fra i valori dei tassi di ventilazione determinati, con riferimento alle condizioni di comfort, in base alle direttive riportate in alcuni fra gli standard più importanti (ASHRAE 62, EEC, NKB e DIN) (Olesen, 1993).

Il confronto viene effettuato in relazione a quattro tipologie diverse di ambienti (due uffici di diverse dimensioni, un auditorium ed una scuola) ed è schematizzato nell'esempio riportato in tabella 11.

I materiali adottati si assumono a basso tasso di emissione ( $0.1 \text{ olf/m}^2$ ), si suppone che l'aria interna sia perfettamente miscelata ( $\epsilon_v = 1$ ) e che l'edificio si trovi in un'area in cui la qualità dell'aria esterna risulta buona ( $< 0.1$  decipol).

Si osserva come i valori ottenuti risultino differenti tra loro pur non mostrando, in generale, differenze significative, salvo quando si utilizza la procedura EEC richiedendo qualità dell'aria interna di categoria A, nel qual caso i tassi calcolati risultano molto più elevati. Inoltre tali valori sono stati ottenuti sotto l'ipotesi di materiali a basso tasso di emissione, per cui, nel caso molto frequente di tassi più elevati ( $\sim 0.3 \text{ olf/m}^2$ ), la differenza riscontrata è ancora maggiore.

Osserviamo infine come per la tipologia di ambiente costituita da uffici di grandi dimensioni a basso tasso di occupazione il valore di ventilazione fornito dalla procedura ASHRAE risulti significativamente più basso degli altri, soprattutto di quello ottenuto dalla procedura EEC, con riferimento ad aria interna di categoria A: ciò si verifica poichè la norma americana determina il tasso in base al numero di occupanti.

*Tabella 11 - Requisiti di ventilazione per alcune categorie di edifici, secondo differenti standard e linee guida (Olesen, 1993)*

Categoria edificio	Tasso di occupazione	ASHRAE 62-89	Rapporto EEC No.11*			Pubblicazione NKB 61E	DIN 1946 (Draft - 1991)
			A	B	C		
	persone/m <sup>2</sup>	l/s m <sup>2</sup>	l/s m <sup>2</sup>			l/s m <sup>2</sup>	l/s m <sup>2</sup>
Ufficio monovano 10 m <sup>2</sup> senza fumatori	0.1	1.0	3.3	1.4	0.8	1.1	1.1
Ufficio plurivano senza fumatori	0.07	0.7	2.8	1.2	0.7	0.9	1.7
Ufficio plurivano 20% di fumatori	0.07	0.7	4.0	1.7	1.0	1.4	1.7
Auditorium	1.5	12	26.7	11.4	6.4	10.5	8.3
Aula scolastica	0.5	4	10.0	4.3	2.4	3.5	4.2

\* assumendo materiali da costruzione a bassa emissione ( $0.1 \text{ olf/m}^2$ ).

## CAPITOLO IV: LINEE-GUIDA EUROPEE E PROGETTO DI NORMA CEN

### 1. Descrizione delle linee-guida europee

In questa sezione verrà descritta in dettaglio la metodologia di valutazione dei tassi di ventilazione negli edifici contenuta nelle linee-guida europee, che al momento costituisce il metodo più organico per il calcolo dei tassi con riferimento alla rimozione degli inquinanti indoor.

La novità di tali linee-guida risiede nell'introduzione di una procedura più analitica rispetto a quella proposta dalla normativa americana, che si basa essenzialmente su un metodo prescrittivo. Tuttavia una tale diversità di approccio rispetto alle procedure raccomandate dallo standard ASHRAE genera ovviamente differenze significative nei valori dei tassi di ventilazione calcolati.

In particolare la metodologia proposta prevede che vengano valutati, utilizzando due diverse procedure, i tassi di ventilazione necessari per il benessere ( $Q_c$ ) e per garantire condizioni di salubrità ( $Q_h$ ) e che venga adottato come tasso di ventilazione per l'edificio il valore massimo fra i due:

$$Q = \max\{Q_c, Q_h\}$$

L'intera procedura, per comodità di impiego, può essere descritta per mezzo di una sequenza di passaggi che conducono alla determinazione del tasso di ventilazione da adottare.

*Procedura per la determinazione del tasso di ventilazione necessario per il comfort*

La procedura da seguire per determinare il tasso di ventilazione  $Q_c$  necessario per raggiungere le condizioni di benessere utilizza le due nuove unità introdotte da Fanger, l'olf ed il decipol. Il tasso viene espresso in l/s e calcolato per mezzo della seguente espressione:

$$Q_c = 10 \frac{G}{C_i - C_o} \frac{1}{\epsilon_v} \quad (4.1)$$

in cui  $G$  rappresenta il carico di inquinamento prodotto (in olf),  $C_i$  e  $C_o$  due qualità percepite dell'aria (in decipol), rispettivamente quella desiderata per l'aria interna e quella a livello della presa per l'aria esterna, ed  $\epsilon_v$  l'efficacia di ventilazione.

Il calcolo può essere effettuato tramite una procedura a step, schematizzata in figura 7, che può sinteticamente contenere i seguenti passaggi:

#### **1. Selezione del livello di qualità dell'aria interna desiderata:**

in fase di progettazione bisogna stabilire il livello di qualità desiderato per l'aria interna all'ambiente ventilato considerato. A tal fine va fatto riferimento ad una tabella che presenta tre categorie di qualità dell'aria, ciascuna corrispondente ad una data percentuale di insoddisfatti (10%, 20% e 30%) e, sotto condizioni particolari, ad un determinato tasso di ventilazione (tab. 12).

*Tabella 12 - I tre livelli di qualità percepita dell'aria interna.*

Livello di qualità (categoria)	Qualità percepita dell'aria		Tasso di ventilazione necessario* (l/s olf)
	% d'insoddisfatti	decipol	
A	10	0.6	16
B	20	1.4	7
C	30	2.5	4

\* I tassi di ventilazione riportati sono esempi che si riferiscono esclusivamente alla qualità percepita dell'aria e valgono solo per l'aria esterna pulita e un'efficacia di ventilazione pari ad uno.

Osserviamo come i livelli di qualità percepita dell'aria riportati si riferiscano alla prima impressione dei visitatori di un dato ambiente: è importante infatti cogliere tale prima impressione poichè in pochi minuti l'organismo si adatta ai bioeffluenti umani.

Il livello di qualità percepita dell'aria interna, a partire dalla percentuale di insoddisfatti, può essere anche ricavato dalla seguente relazione (Fanger, 1988), riportata in figura 8:

$$C_i = \frac{112}{[\ln(PD) - 5.98]^4} \quad (4.2)$$

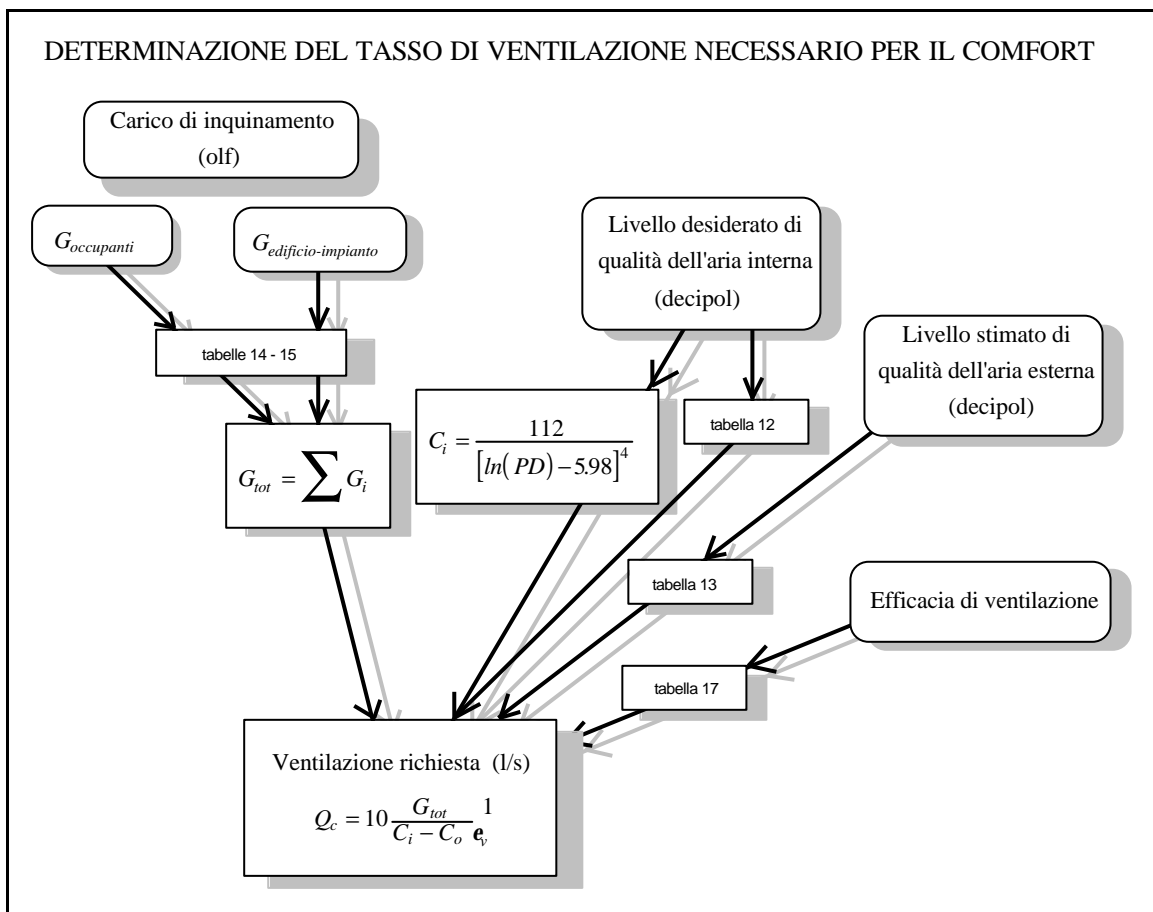


Figura 7 - Diagramma di flusso della procedura per la determinazione del tasso necessario per il comfort.

La decisione di optare per un dato livello di qualità in un determinato ambiente dipende da considerazioni aventi carattere economico, oltre che dall'uso a cui è adibito l'ambiente stesso.

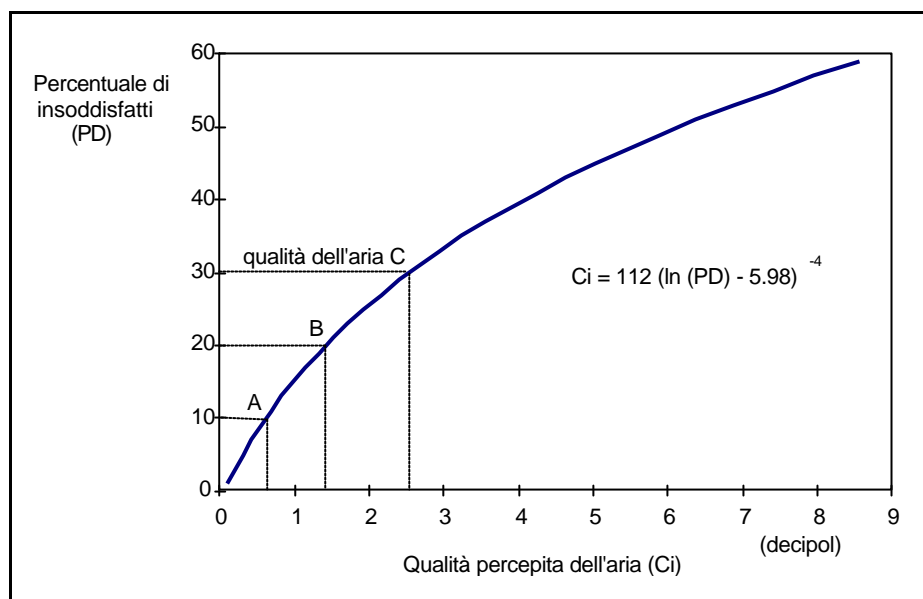


Figura 8 - Relazione tra la qualità percepita dell'aria espressa in percentuale di insoddisfatti ed in decipol.

## 2. Valutazione della qualità percepita dell'aria esterna disponibile:

in questa seconda fase si stabilisce il livello di qualità dell'aria esterna, selezionandolo fra tre differenti livelli di qualità percepita, determinati in base alle concentrazioni di quattro tipiche sostanze inquinanti (anidride carbonica, ossido di carbonio, perossido di azoto, anidride solforosa) (tab. 13).

A tal fine si può fare anche riferimento alla figura 9, che riporta un diagramma sviluppato dagli stessi autori, per mezzo del quale è possibile determinare graficamente, in base ai corrispondenti limiti di concentrazione delle quattro sostanze inquinanti, i tre livelli di qualità percepita dell'aria (Costanzo et al., 1995).

Tabella 13 - Livelli di qualità dell'aria esterna\*

	Qualità percepita dell'aria (decipol)	Inquinanti dell'aria			
		anidride carbonica (mg/m <sup>3</sup> )	ossido di carbonio (mg/m <sup>3</sup> )	perossido di azoto (mg/m <sup>3</sup> )	anidride solforosa (mg/m <sup>3</sup> )
Al mare	0	680	0 - 0.2	2	1
In città, buona qualità	< 0.1	700	1 - 2	5 - 20	5 - 20
In città, scarsa qualità	> 0.5	700-800	4 - 6	50 - 80	50 - 100

\* I dati sulla qualità percepita dell'aria corrispondono ai valori medi rilevati quotidianamente. I valori dei quattro inquinanti sono le concentrazioni medie annue.

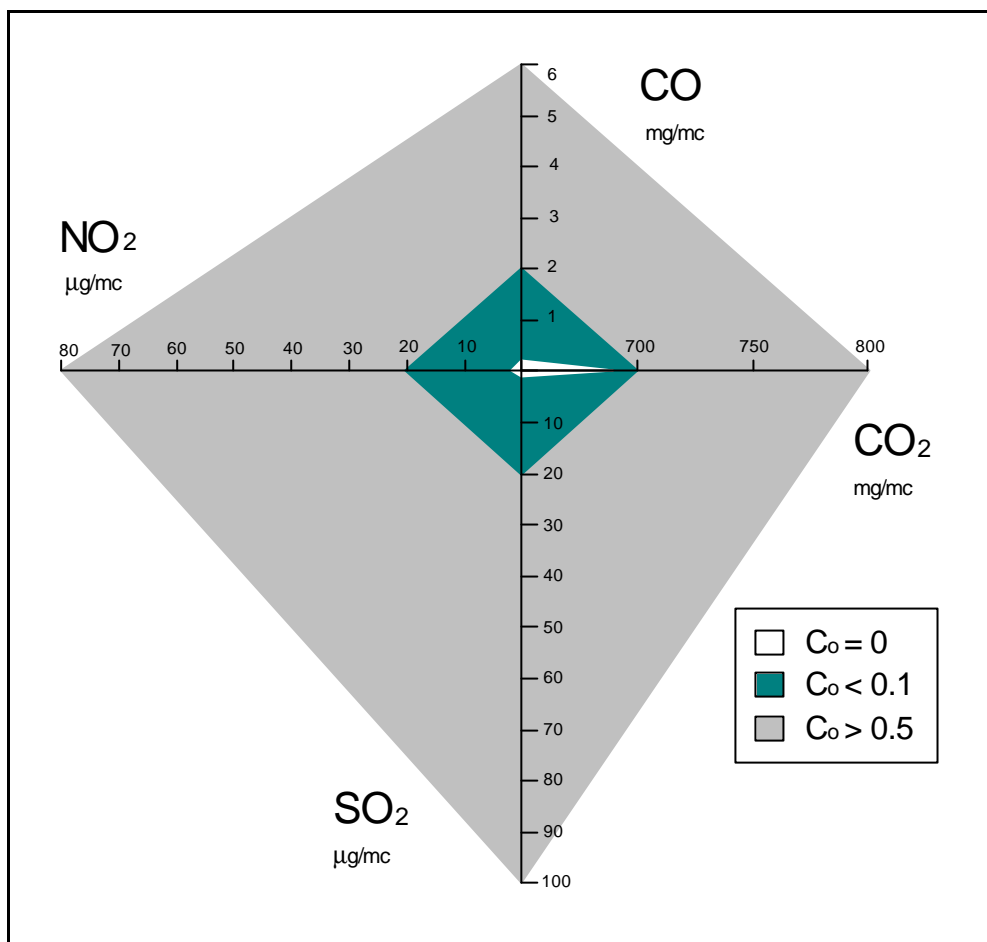


Figura 9 - Determinazione della qualità percepita dell'aria esterna con riferimento alle quattro sostanze inquinanti indicate nelle linee guida europee.

### 3. Valutazione del carico di inquinamento prodotto:

viene determinato quindi il carico di inquinamento prodotto, valutandolo come somma dei contributi delle diverse sorgenti inquinanti presenti nell'ambiente:

$$G_{tot} = \sum G_i$$

Fra di esse si devono considerare gli occupanti e le relative attività che vi svolgono (compresa l'abitudine di fumare) e l'edificio completo di accessori, arredi e sistema di ventilazione. In particolare, il carico di inquinamento prodotto dall'edificio va valutato come somma dei carichi determinati da ogni singolo materiale presente.

Le stesse linee-guida riportano alcuni valori indicativi sui carichi inquinanti emessi sia dagli occupanti (espressi in olf/occupante) (tab. 14), che dai materiali costituenti la struttura edilizia e dall'impianto (espressi in olf/m<sup>2</sup>pavimento) (tab. 15).

In particolare, la tabella 14 riporta il carico di inquinamento per occupante in dipendenza della percentuale di fumatori presenti e del livello di attività fisica praticata.

Un'ulteriore tabella riporta esempi tipici di occupazione di ambienti (espressi in numero di occupanti per m<sup>2</sup> di pavimento) (tab. 16).

Tabella 14 - Carico di inquinamento prodotto dagli occupanti.

	carico prodotto (olf/occupante)	anidride carbonica (l/h occupante)	ossido di carbonio <sup>2</sup> (l/h occupante)	vapore acqueo <sup>3</sup> (g/h occupante)
<b>Sedentari, 1-1.2 met<sup>1</sup></b>				
fumatori 0%	1	19		50
fumatori 20% <sup>4</sup>	2	19	11.10 <sup>-3</sup>	50
fumatori 40% <sup>4</sup>	3	19	21.10 <sup>-3</sup>	50
fumatori 100% <sup>4</sup>	6	19	53.10 <sup>-3</sup>	50
<b>Esercizio fisico</b>				
livello basso, 3 met	4	50		200
livello medio, 6 met	10	100		430
livello alto, 10 met (atleti)	20	170		750
<b>Bambini</b>				
Asilo, 3-6 anni, 2.7 met	1.2	18		90
Scuola, 14-16 anni, 1-1.2 met	1.3	19		50

<sup>1</sup> 1 met è la velocità del metabolismo di un individuo sedentario in condizioni di riposo (1 met = 58W/m<sup>2</sup> di pelle, ovvero circa 100 W per una persona media).

<sup>2</sup> Derivato dal fumo di tabacco.

<sup>3</sup> Per gli individui prossimi alla neutralità termica.

<sup>4</sup> In media 1.2 sigarette/ora per fumatore, velocità di emissione pari a 44 ml CO/sigaretta.

Tabella 15 - Carico inquinante prodotto dall'edificio completo di mobili e sistemi di ventilazione.

	Carico prodotto (olf/m <sup>2</sup> pav)		Carico chimico (TVOC mg/s m <sup>2</sup> pav)	
	media	range	media	range
<b>Edifici esistenti</b>				
uffici <sup>1</sup>	0.3	0.02-0.95	— <sup>6</sup>	
scuole (aule) <sup>2</sup>	0.3	0.12-0.54	— <sup>6</sup>	
asili <sup>3</sup>	0.4	0.20-0.74	— <sup>6</sup>	
sale riunioni <sup>4</sup>	0.5	0.13-1.32	— <sup>6</sup>	
abitazioni <sup>5</sup>			0.2	0.1-0.3
<b>Edifici poco inquinanti</b>				
valori target		0.05-0.1	— <sup>6</sup>	

<sup>1</sup> Dati relativi a 24 edifici a uso ufficio con ventilazione meccanica

<sup>2</sup> Dati relativi a 6 scuole con ventilazione meccanica

<sup>3</sup> Dati relativi a 9 asili con ventilazione meccanica

<sup>4</sup> Dati relativi a 5 sale riunioni con ventilazione meccanica

<sup>5</sup> Dati relativi a 3 edifici uso abitazione con ventilazione naturale

<sup>6</sup> Dati non ancora disponibili

Tabella 16 - Esempio di occupazione di ambienti.

	Occupanti/m <sup>2</sup> pav
Uffici	0.07
Sale per conferenze	0.5
Sale riunioni, aule magne, auditori	1.5
Scuole	0.5
Asili	0.5
Abitazioni	0.05

#### 4. Valutazione dell'efficacia di ventilazione:

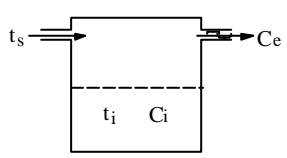
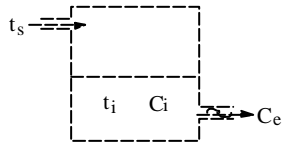
in ultimo si valuta l'efficacia di ventilazione, in dipendenza del tipo di ventilazione adottata (tab. 17).

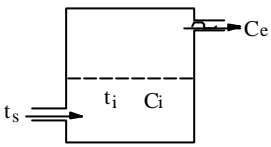
Osserviamo come i valori di  $\epsilon_v$  riportati in tabella siano determinati soltanto con riferimento alla distribuzione dell'aria ed alla sua temperatura all'immissione; non viene pertanto presa in considerazione l'ubicazione delle sorgenti inquinanti nell'ambiente, che si ipotizzano uniformemente distribuite.

Nel valutare l'efficacia di ventilazione di solito si divide l'ambiente in due parti, una delle quali comprende la zona di immissione e l'altra il resto della stanza. Se, in particolare, la ventilazione è del tipo a miscelazione, la zona dell'aria di mandata generalmente si trova al di sopra di quella di respirazione, e le migliori condizioni di miscelazione si ottengono quando questa è tale che le due zone si confondono.

Nella ventilazione a dislocamento invece la zona di estrazione è ubicata superiormente alla zona di immissione e le condizioni migliori si realizzano quando la miscelazione fra le due zone è minima.

Tabella 17 - Efficacia di ventilazione nella zona di respirazione in ambienti ventilati con tecniche diverse.

Principio di ventilazione	Differenza di temperatura tra l'aria di immissione e l'aria della zona di respirazione, $t_s - t_i$ (°C)	Efficacia di ventilazione
Ventilazione per miscelazione 	$< 0$ $0 \div 2$ $2 \div 5$ $> 5$	$0.9 \div 1.0$ 0.9 0.8 $0.4 \div 0.7$
Ventilazione per miscelazione 	$< -5$ $0 \div -5$ $> 0$	0.9 $0.9 \div 1.0$ 1.0

Ventilazione a dislocamento 	$> 2$ $0 \div 2$ $< 0$	$0.2 \div 0.7$ $0.7 \div 0.9$ $1.2 \div 1.4$
--	------------------------------	--

### 5. Determinazione del tasso di ventilazione necessario:

quest'ultimo passaggio consiste semplicemente nell'applicazione diretta dell'equazione (4.1), a partire dai parametri individuati nei passi precedenti.

*Procedura per la determinazione del tasso di ventilazione necessario per evitare danni alla salute*

Una procedura per certi versi analoga si utilizza per determinare il tasso di ventilazione  $Q_h$  necessario per evitare di provocare danni alla salute. In particolare, l'espressione analitica cui fare ricorso ha la stessa espressione formale di quella adottata per determinare il tasso di ventilazione di comfort, ma fa riferimento a grandezze diverse:

$$Q_h = \frac{G}{C_i - C_o} \frac{1}{e_v} \quad (4.3)$$

In essa  $G$  rappresenta il carico di inquinamento chimico, espresso in  $\mu\text{g/s}$ ,  $C_i$  e  $C_o$  due concentrazioni per le sostanze chimiche (esprese in  $\mu\text{g/l}$ ), rispettivamente quella ammissibile e quella esterna alla presa d'aria, ed  $e_v$  ancora l'efficacia di ventilazione.

$C_i$  e  $C_o$  possono anche essere espresse in ppm in volume ed in tal caso  $G$  viene espresso in l/s.

La procedura sinteticamente può riassumersi nei seguenti passaggi:

#### 1. Identificazione della sostanza chimica più critica e valutazione del suo carico di inquinamento chimico:

prima di procedere, è necessario individuare preventivamente la sostanza chimica più critica (o il gruppo di sostanze) e valutarne il relativo carico di inquinamento chimico, ossia il potenziale inquinante nell'ambiente.

Il carico di inquinamento relativo a più sostanze chimiche si determina come somma dei singoli carichi.

#### 2. Individuazione della relativa massima concentrazione ammissibile, se disponibile:

consultando l'*Allegato C* delle linee-guida, che riporta il riassunto delle direttive europee emanate dalla WHO sulla qualità dell'aria (WHO, 1987) e contiene diverse tabelle riportanti, per gran parte delle sostanze inquinanti indoor, valori di concentrazione massima consigliati (per alcune sostanze sono riportate le valutazioni di rischio).

#### 3. Individuazione del livello di sensibilità degli occupanti in base al tipo di effetti sulla salute da considerare:

è inoltre necessario decidere su quale tipo di effetti sulla salute interessa focalizzare l'attenzione (irritazioni, allergie, tumori, ecc.) e valutare la sensibilità dei gruppi di occupanti che si vogliono proteggere.



#### **4. Determinazione della concentrazione della sostanza all'esterno della presa d'aria:**

è necessario rilevare sperimentalmente la concentrazione esterna della sostanza in esame (per alcune sostanze valori tipici sono riportati in tabella 13 e figura 9).

#### **5. Valutazione dell'efficacia di ventilazione:**

si determina infine l'efficacia di ventilazione in dipendenza del tipo di ventilazione adottata, con riferimento alla tabella 17.

#### **6. Calcolo del tasso di ventilazione necessario:**

da effettuare applicando l'equazione (4.2) ed utilizzando i parametri determinati nei passi precedenti.

Una volta calcolati i due tassi di ventilazione necessari per il comfort e la salubrità verrà quindi adottato come tasso di ventilazione per l'edificio il valore massimo fra i due.

## **2. Applicabilità delle procedure**

Entrambe le equazioni utilizzate nell'ambito delle precedenti procedure si riferiscono a condizioni di regime stazionario e non prendono in considerazione la presenza di eventuali reazioni chimiche, assorbimento o desorbimento nell'ambiente; inoltre, perchè siano applicabili è necessario che la qualità dell'aria esterna risulti migliore di quella interna.

Al momento l'applicazione di entrambe le procedure presenta tuttavia alcune difficoltà, in generale attribuibili alla loro recente elaborazione, e ciò rappresenta uno dei principali punti deboli della metodologia proposta.

In particolare, la procedura relativa alla determinazione del tasso di ventilazione necessario per il comfort presenta limiti di applicabilità sia per quanto riguarda la sua estensione agli edifici residenziali che la sua utilizzazione per analisi concernenti interi gruppi di edifici.

Per gli edifici residenziali i valori dei carichi di inquinamento provocati dal sistema edificio-impianto e dai suoi annessi non sono infatti reperibili con lo stesso dettaglio con cui lo sono per gli edifici commerciali, se si eccettuano alcuni valori di target relativi ad edifici poco inquinanti (anche per tali edifici, tuttavia, le informazioni disponibili al momento sono poco più che sufficienti).

In generale un'applicazione corretta della procedura necessita di tabelle contenenti, per i materiali più comuni, i valori dei relativi tassi di emissione (espressi in olf) utilizzabili da architetti ed ingegneri per selezionare in fase di progetto materiali a basso tasso di emissione.

Sarebbe inoltre auspicabile che le ditte produttrici di materiali edili e di arredamento quantificassero il valore in olf dei loro prodotti.

Anche la procedura da seguire per evitare di provocare danni alla salute presenta analoghe difficoltà, ancora riconducibili alla sua recente elaborazione.

In particolare, il limite attuale risiede nell'ancora scarsa disponibilità di dati concernenti il carico di inquinamento chimico delle sostanze generalmente presenti negli ambienti confinati: salvo per gli edifici a carattere industriale, risulta infatti difficile reperire dati anche per quel che riguarda i valori limite ammissibili per le diverse sostanze presenti.

A differenza degli edifici industriali, nei quali i lavoratori sono in genere esposti ad una o più sostanze chimiche alla volta, ben note ed utilizzate quotidianamente nei processi produttivi<sup>(3)</sup>, negli edifici residenziali e commerciali, per contro, l'esposizione è caratterizzata da un ampio range di composti, emessi da un gran numero di sorgenti e spesso non facilmente identificabili, ed è in genere molto più bassa che nell'industria. Conseguentemente i livelli di concentrazione riscontrati sono molto bassi, in genere di alcuni ordini di grandezza inferiori ai valori di soglia prefissati per gli ambienti industriali.

Per tale ragione i dati riportati nelle linee-guida riguardano solo alcune delle sostanze chimiche presenti negli edifici non industriali. In tali condizioni risulta difficile anche l'individuazione della sostanza chimica più critica e la valutazione dei rischi.

Come per la procedura relativa al comfort, anche ai fini di un'efficace applicazione di questa seconda procedura risulta pertanto indispensabile disporre, in un futuro alquanto prossimo, di tabelle contenenti le concentrazioni massime ammissibili per le varie sostanze chimiche, con i relativi tempi di esposizione.

Il riferimento più completo attualmente utilizzabile è costituito dalle "Direttive sulla qualità dell'aria in Europa", emanate dall'Organizzazione Mondiale della Sanità (WHO, 1987), che contengono valutazioni degli effetti sulla salute relativi ad alcuni inquinanti atmosferici ed i relativi valori di riferimento per più di 25 sostanze chimiche presenti nell'aria, sia interna che esterna (vedi Allegato C linee-guida EEC).

Tali limiti sono applicabili in caso di presenza separata di ogni singolo inquinante: infatti gli effetti sinergici di diversi inquinanti presenti con bassi livelli di concentrazione non sono ancora prevedibili sulla base delle conoscenze attuali.

Per le ragioni viste, nelle linee-guida si raccomanda di non limitarsi a diluire per ventilazione le sostanze inquinanti, ma di controllare comunque le sorgenti e di utilizzare, ove possibile, materiali a bassa emissione.

In conclusione si può comunque affermare che, seppure l'attuale insufficienza di dati fino ad oggi non ha permesso di mettere a punto una procedura progettuale analitica sufficientemente compiuta (come quella esistente invece nel campo del benessere termoigrometrico), la procedura europea costituisce ugualmente il primo gradino di una trasformazione verso una nuova visione progettuale. Per tale ragione e per la sua estrema semplicità applicativa, essa si propone pertanto, al momento, come strumento d'indagine estremamente utile per analisi sulle qualità ambientali ed energetiche di edifici, candidandosi a standard più diffuso in futuro, a seguito di successivi affinamenti ed in conseguenza di attese conferme sperimentali.

### **3. Esempi di determinazione di tassi di ventilazione**

Per esemplificare la procedura di determinazione del tasso di ventilazione necessario al fine di ottenere sia il raggiungimento del comfort che di evitare eventuali danni alla salute, sono state prescelte due diverse tipologie di edifici, una di tipo commerciale (*stabile per uffici nuovo*) ed una di tipo residenziale (*abitazione già esistente*).

---

<sup>(3)</sup> per i quali le autorità hanno deciso di fissare valori limite di soglia, noti come *Threshold Limit Values*, applicabili ad ambienti di lavoro in cui le sostanze chimiche vengano usate routinariamente nei processi di produzione.

## **1. Determinazione del tasso di ventilazione necessario per il raggiungimento del comfort**

La relazione da utilizzare è la (4.1). I relativi passaggi da seguire prevedono:

1. selezione del livello di qualità dell'aria interna desiderata (tab. 12);
2. valutazione della qualità percepita dell'aria esterna (tab. 13);
3. determinazione del carico di inquinamento prodotto da ogni occupante (tab. 14);
4. stima del tasso di occupazione dell'ambiente (tab. 16);
5. determinazione del carico di inquinamento totale prodotto dagli occupanti;
6. determinazione del carico di inquinamento prodotto dall'edificio (tab. 15);
7. valutazione dell'efficacia di ventilazione (tab. 17);
8. determinazione del tasso di ventilazione.

## **2. Determinazione del tasso di ventilazione necessario per evitare danni alla salute**

La relazione da utilizzare è invece la (4.3) ed i relativi passaggi si riassumono in:

1. individuazione della sostanza chimica più critica;
2. valutazione del suo carico di inquinamento chimico nell'ambiente;
3. determinazione della sua concentrazione massima ammissibile;
4. individuazione del livello di sensibilità degli occupanti in base al tipo di effetti sulla salute da considerare;
5. determinazione della sua concentrazione all'esterno della presa d'aria;
6. valutazione dell'efficacia di ventilazione;
7. determinazione del tasso di ventilazione necessario.

Una volta determinato il valore del tasso di ventilazione in base ad entrambe le procedure si assume come valore di progetto il maggiore fra quelli ottenuti.

*esempio 1: Stabile per uffici nuovo:*

Procedura per la determinazione del tasso di ventilazione necessario per il *comfort*:

La qualità richiesta per l'aria interna viene ipotizzata appartenere alla categoria B (corrispondente ad una presenza del 20% di insoddisfatti), per la quale dalla tabella 12 si legge  $C_i = 1.4$  decipol.

Si effettua inoltre l'ipotesi che l'edificio sia ubicato in una zona in cui la qualità dell'aria esterna è buona ( $C_o = 0.07$  decipol) (tab. 13).

Si suppone che solo il 20% degli occupanti fumi, nel qual caso si produce un carico inquinante di 2 olf/occupante (tab. 14).

Assumendo infine un tasso di occupazione pari a 0.07 occupanti/m<sup>2</sup>pavimento (tab. 16), il carico totale riferito agli occupanti risulta pari a  $(2 \text{ olf/occupante})(0.07 \text{ occupanti/m}^2\text{pavimento}) = 0.14 \text{ olf/m}^2\text{pavimento}$ .

Essendo l'edificio nuovo, i materiali utilizzati risultano poco inquinanti, tali per cui il relativo carico inquinante risulta pari a 0.1 olf/m<sup>2</sup> pavimento (tab. 15):

Pertanto il carico di inquinamento totale  $G$ , dato dalla somma dei carichi relativi agli occupanti e di quelli relativi all'edificio risulta pari a  $(0.14 + 0.1) = 0.24 \text{ olf/m}^2\text{pavimento}$ .

L'efficacia di ventilazione  $e_v$  viene stimata attorno ad 1.2 (tab. 17).

Sostituendo tali valori nell'espressione di  $Q_c$  si trova il valore di:

$$Q_c = 10 \frac{(2 \cdot \text{olf} / \text{occupante})(0.07 \text{occupanti} / \text{m}^2 \text{pav}) + (0.1 \cdot \text{olf} / \text{m}^2 \text{pav})}{(1.4 \text{decipol}) - (0.07 \text{decipol})} \frac{1}{1.2} = 1.5 \text{ l} / \text{s} \cdot \text{m}^2 \text{pav}$$

Procedura per la determinazione del tasso di ventilazione necessario per *evitare danni alla salute*:

Per quanto riguarda l'aspetto sanitario, si suppone che la presenza di fumatori sia l'unico fattore di rischio dovuto all'ambiente e che, nelle condizioni descritte, potrebbe, al più, essere causa di irritazioni.

Pertanto, in relazione al fumo di tabacco la sostanza chimica più critica risulta il monossido di carbonio.

In corrispondenza di una percentuale di fumatori del 20% si verifica un'emissione di monossido di carbonio pari a  $11 \cdot 10^{-3} \text{ l/h-occupante}$  (tab. 14), per cui il carico di inquinamento chimico totale  $G$  risulta pari a  $(0.07 \text{occupanti/m}^2\text{pavimento})(11 \cdot 10^{-3} \text{ l/h-occupante}) = 0.77 \cdot 10^{-3} \text{ l/h} \cdot \text{m}^2\text{pavimento}$ .

Il limite nella concentrazione di CO per prevenire gli effetti irritanti del fumo di tabacco, con riferimento ad un periodo medio di 8 ore, è pari a  $10 \text{ mg/m}^3$  (Allegato C, tabella II).

La concentrazione di tale sostanza all'esterno della presa d'aria si suppone sia  $1.7 \text{ mg/m}^3$ .

In queste condizioni il tasso di ventilazione necessario risulta pari a:

$$Q_h = \frac{(0.07 \text{occupanti} / \text{m}^2 \text{pav})(11 \cdot 10^{-3} \text{ l} / \text{h occupanti})}{(10 \cdot \text{mg} / \text{m}^3) - (1.7 \cdot \text{mg} / \text{m}^3)} \frac{1}{1.2} =$$

$$= \frac{(0.77 \cdot 10^{-3} \text{ l} / \text{h} \text{m}^2 \text{pav})}{(8.3 \cdot \text{mg} / \text{m}^3 \cdot 1.149 \cdot \text{ppm} \cdot \text{m}^3 / \text{mg})10^{-6} (3600 \text{s} / \text{h})} \frac{1}{1.2} = 0.019 \text{ l} / \text{s} \cdot \text{m}^2 \text{pav}$$

A livello progettuale viene quindi scelto il valore del tasso necessario per il benessere che risulta il maggiore fra i due.

*esempio 2: Abitazione già esistente*

Procedura per la determinazione del tasso di ventilazione necessario per il *comfort*:

Per tale abitazione si ipotizza una richiesta di qualità dell'aria di categoria C (in corrispondenza alla quale si constata una percentuale d'insoddisfazione del 30%), per la quale risulta  $C_i = 2.5 \text{ decipol}$  (tab. 12).

Si effettua inoltre l'ipotesi che l'abitazione si trovi in una zona in cui la qualità dell'aria esterna sia relativamente buona ( $C_o = 0.2 \text{ decipol}$ ) (tab. 13).

Si suppone che gli occupanti generalmente non fumino, per cui il carico di inquinamento da essi prodotto risulta pari ad  $1 \text{ olf/occupante}$  (tab. 14). Se il tasso di occupazione è pari a 0.05

occupanti/m<sup>2</sup>pavimento (tab. 16), il carico totale riferito agli occupanti risulta pari a (1 olf/occupante)(0.05 occupanti/m<sup>2</sup>pavimento) = 0.05 olf/m<sup>2</sup>pavimento.

Non essendo l'edificio nuovo, i materiali utilizzati sono di livello standard, con relativo carico di inquinamento pari a 0.3 olf/m<sup>2</sup>pavimento (tab. 15).

In base a questi valori il carico totale  $G$  risulta pari a  $(0.05 + 0.3) = 0.35$  olf/m<sup>2</sup>pavimento.

Si suppone infine che venga applicata una ventilazione per miscelazione, con un'efficacia pari a 1 (tab. 17).

In tali condizioni il valore ottenuto per  $Q_c$  risulta pari a:

$$Q_c = 10 \frac{(1 \cdot \text{olf} / \text{occupante})(0.05 \text{occupanti} / \text{m}^2 \text{pav}) + (0.3 \cdot \text{olf} / \text{m}^2 \text{pav})}{(2.5 \cdot \text{decipol}) - (0.2 \cdot \text{decipol})} \frac{1}{1} = 1.59 \text{ l} / \text{s} \cdot \text{m}^2 \text{pav}$$

Procedura per la determinazione del tasso di ventilazione necessario per *evitare danni alla salute*:

In relazione all'aspetto sanitario, si suppone che i problemi principali siano attribuibili alle emissioni di formaldeide (che costituisce pertanto la sostanza chimica più critica) da parte del truciolato utilizzato in alcuni pannelli di separazione, aventi una superficie di 3 m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>pavimento.

Il truciolato provoca un'emissione relativamente elevata, pari a 75 µg/h·m<sup>2</sup>. Il carico di inquinamento chimico  $G$  corrispondente risulta pari a  $(3 \text{ m}^2/\text{m}^2\text{pavimento})(75 \text{ µg}/\text{h}\cdot\text{m}^2)/3600 \text{ s} = 0.06 \text{ µg}/\text{s}\cdot\text{m}^2\text{pavimento}$ .

Per la formaldeide i limiti di esposizione  $C_i$  risultano, per la popolazione in generale ed in relazione ad un periodo medio di 30 minuti, pari a 100 µg/m<sup>3</sup> (Allegato C, tabella II).

Si suppone che la concentrazione esterna della sostanza sia trascurabile.

Sulla base di tali elementi il relativo tasso di ventilazione risulta pari a:

$$Q_h = \frac{(0.06 \text{ µg} / \text{s} \cdot \text{m}^2 \text{pav})(1000 \text{ l} / \text{m}^3)}{100 \text{ µg} / \text{m}^3} \frac{1}{1} = 0.6 \text{ l} / \text{s} \cdot \text{m}^2 \text{pav}$$

Essendo tale valore inferiore a quello determinato per il tasso di comfort, sarà quest'ultimo ad essere adottato per la progettazione.

#### 4. Progetto di norma CEN

Si è detto che nell'ambito del Comitato Tecnico TC 156 del CEN, il WG6 nel dicembre 1994 ha predisposto la Bozza di normativa CEN prENV 1752 dal titolo "*Ventilation of buildings - Design criteria for the indoor environment*". Tale bozza riprende i contenuti delle linee-guida emanate dalla *Commissione delle Comunità Europee* per quanto riguarda la qualità dell'aria (EEC, 1992), ma contiene, nel contempo, alcune proposte metodologiche riguardanti la progettazione complessiva del comfort ambientale.

Essa si riferisce, in particolare, agli spazi confinati di destinazione non residenziale contenenti cause di disturbo "moderate" e riguarda pertanto gli ambienti destinati al terziario, al commercio, al tempo libero. Sono esclusi gli ambienti industriali e i locali con alta intensità delle sorgenti di calore, di inquinamento o di rumore.

Nell'ottica di giudicare la qualità complessiva degli ambienti, vengono presi in considerazione tre differenti aspetti:

- a) *il comfort termoigrometrico;*
- b) *la qualità dell'aria;*
- c) *il comfort acustico.*

La caratteristica della norma è di predisporre tre diversi livelli di qualità ambientale, identificati per mezzo delle categorie A, B e C, a cui corrispondono requisiti di controllo via via meno restrittivi e quindi percentuali crescenti di persone insoddisfatte. In base ad essi vengono quindi esplicitati i criteri di progetto, cioè i limiti per le variabili che intervengono nella definizione dei tre aspetti (termico, acustico ed olfattivo) del comfort.

Tali criteri sono relativi ad edifici e locali aventi diversa destinazione d'uso e sono riferiti a valori standard dei dati di riferimento (resistenza termica dell'abbigliamento, attività, densità di occupazione). Il progettista può comunque, in caso di esigenze particolari, selezionare un livello di qualità diverso da quelli proposti, seguendo una procedura più dettagliata che viene riportata in *Appendice A* al progetto di norma.

Le variabili che vengono considerate nella definizione del comfort complessivo dell'ambiente sono:

- la temperatura operativa in condizioni estive ed invernali;
- la velocità media dell'aria;
- il livello di pressione sonora ponderato A;
- la portata d'aria di ricambio, con l'indicazione dell'eventuale ventilazione supplementare qualora sia consentito fumare.

I valori da assumere per tali variabili, nelle condizioni più comuni, sono riportati nella tabella 18, i cui dati sono stati determinati effettuando le seguenti ipotesi:

Tabella 18 - Criteri di progetto per ambienti interni ad edifici a diversa destinazione d'uso, relativi ad alcune grandezze caratteristiche dei diversi aspetti del comfort.

Tipologia di edificio/spazio	Abbigliamento		Attività ( <i>met</i> )	Occupanti ( <i>persona/m<sup>2</sup></i> )	Categoria	Temperatura operativa (°C)		Velocità media dell'aria ( <i>m/s</i> )		Pressione sonora <i>dB(A)</i>	Ventilazione richiesta <i>l/s (m<sup>2</sup>)</i>	Ventilazione aggiuntiva <sup>2</sup> <i>l/s (m<sup>2</sup>)</i>		
	<i>(clo)</i>					Estate	Inverno	Estate	Inverno				Estate	Inverno
	Estate	Inverno												
Ufficio Singolo	0.5	1.0	1.2	0.1	A	24.5±0.5	22.0±1.0	0.18	0.15	30	2.0	-		
					B	24.5±1.5	22.0±2.0	0.22	0.18	35	1.4	-		
					C	24.5±2.5	22.0±3.0	0.25	0.21	40	0.8	-		
Ufficio con vetrate	0.5	1.0	1.2	0.07	A	24.5±0.5	22.0±1.0	0.18	0.15	35	1.7	0.7		
					B	24.5±1.5	22.0±2.0	0.22	0.18	40	1.2	0.5		
					C	24.5±2.5	22.0±3.0	0.25	0.21	45	0.7	0.3		
Sala conferenze	0.5	1.0	1.2	0.5	A	24.5±0.5	22.0±1.0	0.18	0.15	30	6.0	5.0		
					B	24.5±1.5	22.0±2.0	0.22	0.18	35	4.3	3.6		
					C	24.5±2.5	22.0±3.0	0.25	0.21	40	2.4	2.0		
Auditorium	0.5	1.0	1.2	1.5	A	24.5±0.5	22.0±1.0	0.18	0.15	30	16 <sup>1</sup>	-		
					B	24.5±1.5	22.0±2.0	0.22	0.18	33	11	-		
					C	24.5±2.5	22.0±3.0	0.25	0.21	35	6.4	-		
Bar/Ristorante	0.5	1.0	1.4	0.7	A	23.5±1.0	20.0±1.0	0.16	0.13	35	8	-		
					B	23.5±2.0	20.0±2.5	0.20	0.16	45	5.7	-		
					C	23.5±2.5	20.0±3.5	0.24	0.19	50	3.2	5.0		
Aula	0.5	1.0	1.2	0.5	A	24.5±0.5	22.0±1.0	0.18	0.15	30	6.0	2.8		
					B	24.5±1.5	22.0±2.0	0.22	0.18	35	4.3	-		
					C	24.5±2.5	22.0±3.0	0.25	0.21	40	2.4	-		
Asilo	0.5	1.0	1.4	0.5	A	23.5±1.0	20.0±1.0	0.16	0.13	30	7.0	-		
					B	23.5±2.0	20.0±2.5	0.20	0.16	40	5.0	-		
					C	23.5±2.5	20.0±3.5	0.24	0.19	45	2.8	-		
Magazzino	0.5	1.0	1.6	0.15	A	23.0±1.0	19.0±1.5	0.16	0.13	40	3.5	-		
					B	23.0±2.0	19.0±3.0	0.20	0.15	45	2.5	-		
					C	23.0±3.0	19.0±4.0	0.23	0.18	50	1.4	-		

<sup>1</sup> Può essere difficile rispettare i criteri di progetto della categoria A.

<sup>2</sup> Ventilazione aggiuntiva richiesta per il comfort quando il 20% degli occupanti è costituito da fumatori - I rischi derivanti dal fumo passivo vengono considerati separatamente

- per quanto riguarda l'aspetto termoigrometrico, intensità massima della turbolenza inferiore al 40%, umidità relativa pari al 50% ed assenza di discomfort locale;
- per quanto riguarda l'aspetto di qualità dell'aria, impiego di materiali da costruzione e da arredamento a ridotto tasso di emissioni di sostanze inquinanti, impianto con efficienza di ventilazione unitaria, qualità dell'aria esterna eccellente, assenza di fumatori e tasso di occupazione pari a quello riportato.

Se vi è presenza di fumatori, è richiesto un tasso di ventilazione maggiore. In tal caso si può fare riferimento all'ultima colonna della stessa tabella, che prescrive il supplemento di ventilazione necessario nell'ipotesi che il 20% degli occupanti fumi. Non viene considerato il rischio dovuto a fumo passivo.

Una seconda tabella (tab. 19) fornisce i tassi di ventilazione, con riferimento alle tre categorie ed alla percentuale di fumatori, nell'ipotesi che gli occupanti siano la sola sorgente di inquinamento.

La norma prevede inoltre, per tutti quei casi in cui le situazioni previste dalle tabelle non rispecchino le situazioni reali, il ricorso a metodologie più dettagliate per la verifica degli standard di qualità dell'ambiente per ognuna delle tre categorie di qualità ambientale. In tal caso andranno definite separatamente le prestazioni dell'edificio per quanto riguarda gli aspetti termico, acustico e di qualità dell'aria seguendo le indicazioni riportate in appendice alla norma.

Relativamente all'aspetto termico (*Appendice A1*) l'analisi va condotta con riferimento alle norme ISO 7730, 9920 e 8996 ed al progetto EN 27730, mentre per quanto riguarda l'aspetto acustico (*Appendice A3*) la norma indica, per ogni categoria di qualità ambientale e per varie destinazioni d'uso dell'edificio, valori di pressione sonora da non superare, espressi in dB(A), e fa riferimento alle norme ISO 11201 e 3744 ed ai relativi progetti EN 31201 e EN 23744.

Infine per le analisi di qualità dell'aria (*appendice A2*) la norma ripropone la metodologia contenuta nelle Linee Guida della Comunità Europea ECC COST Project 613 Report n. 11.

*Tabella 19 - Portata d'aria di ricambio (l/s per persona) in funzione della percentuale di fumatori.*

Categoria	Percentuale di fumatori			
	0%	20%	40%	100%
A	10	20	30	60
B	7	14	21	42
C	4	8	12	24

## **5. Considerazioni sull'applicabilità della procedura**

I contenuti della proposta di norma CEN sono stati sottoposti ad attento esame da parte dei paesi aderenti al CEN, in seguito al quale sono divenuti oggetto, in numerose sedi, di momenti di confronto e dibattito.

Riportiamo, in particolare, la posizione italiana rispetto a tale progetto: il gruppo di lavoro preposto, pur sottolineando l'importanza della proposta, ha avanzato alcune riserve in merito, riguardanti in particolare:



1. l'inapplicabilità del principio di sovrapposizione degli effetti olfattivi che scaturisce dalla proposta di additività delle sorgenti inquinanti e porta alla conseguenza di sovrastimare le portate d'aria;
2. l'eccessiva complessità della procedura indicata per la determinazione dell'efficienza di ventilazione, che andrebbe sostituita con metodi semplificati;
3. l'inadeguatezza attuale dei dati sui carichi di inquinamento (attualmente limitati a pochi materiali), incompleti sia dal punto di vista chimico che sensoriale;
4. la necessità di sviluppare metodi di misura basati su strumenti affidabili ed oggettivi, quali i sensori per il rilevamento degli odori e delle sostanze nocive all'uomo, da utilizzare in sostituzione del pannello addestrato di persone.

Oltre a quanto esposto, un ulteriore punto debole che emerge dall'analisi della metodologia è l'ipotesi di proporzionalità diretta esistente fra percezione olfattiva e carico di inquinamento, a parità di portata, che implicitamente assume una diretta proporzionalità anche fra percezione olfattiva e concentrazione, anch'essa tutt'altro che provata.

Inoltre ricordiamo che le equazioni utilizzate nell'ambito delle procedure sono valide solo in condizioni di regime stazionario, il che non consente, fra l'altro, di prendere in considerazione la presenza di eventuali reazioni chimiche, assorbimento o desorbimento nell'ambiente.

Fra tutti quelli emersi, in particolare gli aspetti più discutibili risiedono nelle ipotesi di proporzionalità fra livello di inquinamento e percezione olfattiva e di sovrapposizione degli effetti delle varie sorgenti inquinanti.

Per quanto riguarda la prima ipotesi, va osservato come gli studi sulla percezione olfattiva siano concordi nell'affermare che la sensazione olfattiva (una grandezza concettualmente analoga a quella utilizzata nelle linee-guida EEC, ma espressa per mezzo di una differente unità di misura) non segue una legge lineare con la concentrazione, bensì la seguente *legge di Stevens* (Stevens, 1957), analoga a quelle valide, in generale, per tutti i fenomeni psicologici:

$$S = kC^n \quad (4.4)$$

in cui  $S$  è la percezione olfattiva,  $C$  la concentrazione di inquinante,  $k$  ed  $n$  due costanti.

Per tutte le sostanze risulta  $n < 1$ , per cui incrementando la concentrazione di inquinanti l'incremento di sensazione olfattiva diviene sempre più contenuto.

L'unità di misura utilizzata per la sensazione olfattiva è detta *Unità di Intensità (UI)* ed è definita dalla relazione:

$$S = 0.26 \cdot C^{0.66} \quad (4.5),$$

in cui  $S$  è la percezione olfattiva percepita per una concentrazione  $C$  (ppm) di 1-Butanolo (Moskowitz et al., 1974). (Il decipol è invece basato sul 2-propanone). Dalla relazione precedente deriva che 1 UI è pari alla sensazione prodotta da una concentrazione di 7.7 ppm di 1-Butanolo (fig. 10).

La legge di Stevens comporta l'assenza di proporzionalità diretta fra tasso di emissione e percezione (in assenza di inquinamento nell'aria esterna,  $C_0 = 0$ , e con efficacia di ventilazione pari ad 1), contrariamente a quanto risulta dall'espressione (4.1) per il calcolo della portata d'aria necessaria per il comfort contenuta nelle linee-guida EEC.

In figura 11 è riportato un diagramma esemplificativo che consente di visualizzare le differenze che si generano utilizzando un'espressione lineare in luogo della legge di Stevens.

Va tuttavia osservato come la metodologia proposta da Fanger, introducendo la percentuale di insoddisfatti, consente comunque di reintrodurre la non linearità nella relazione fra stimolo e grado di soddisfazione degli occupanti (vedi espressione riportata in figura 2).

Per quanto riguarda invece l'ipotesi di sovrapposizione degli effetti delle varie sorgenti inquinanti, osserviamo come un approccio corretto necessiti di un'appropriata metodologia di valutazione dell'effetto combinato di sorgenti differenti.

L'effetto prodotto da due sorgenti inquinanti è ben lontano dal risultare la somma degli effetti prodotti singolarmente dalle sorgenti; inoltre, poichè i meccanismi di percezione sono differenti, andrebbero distinti differenti tipi di odori.

Esistono, in particolare, il *senso olfattivo* vero e proprio, che ha sede nella mucosa nasale ed è responsabile dell'identificazione degli odori, ed il *senso chimico comune*, che non ha recettori preposti e consente di percepire le sensazioni dette "pungenti". La sensazione complessiva è detta *intensità nasale totale percepita*.

In merito a tale effetto complessivo, numerosi studi (Cometto Muñiz e Hernandez, 1990) hanno evidenziato che l'interazione fra odori diversi e quindi la sensazione nasale totale percepita è in genere ipoadditiva, per cui per contributi olfattivi provenienti da sorgenti diverse non è applicabile il principio di sovrapposizione degli effetti (talora tale conclusione è valida anche per contributi di stessa fonte).

Tali effetti pertanto andrebbero sommati, utilizzando le ben note leggi psicofisiche, solo entro categorie ben definite di inquinanti e solo in un secondo momento fra loro, utilizzando espressioni ipoadditive che consentono di determinare la sensazione olfattiva risultante.

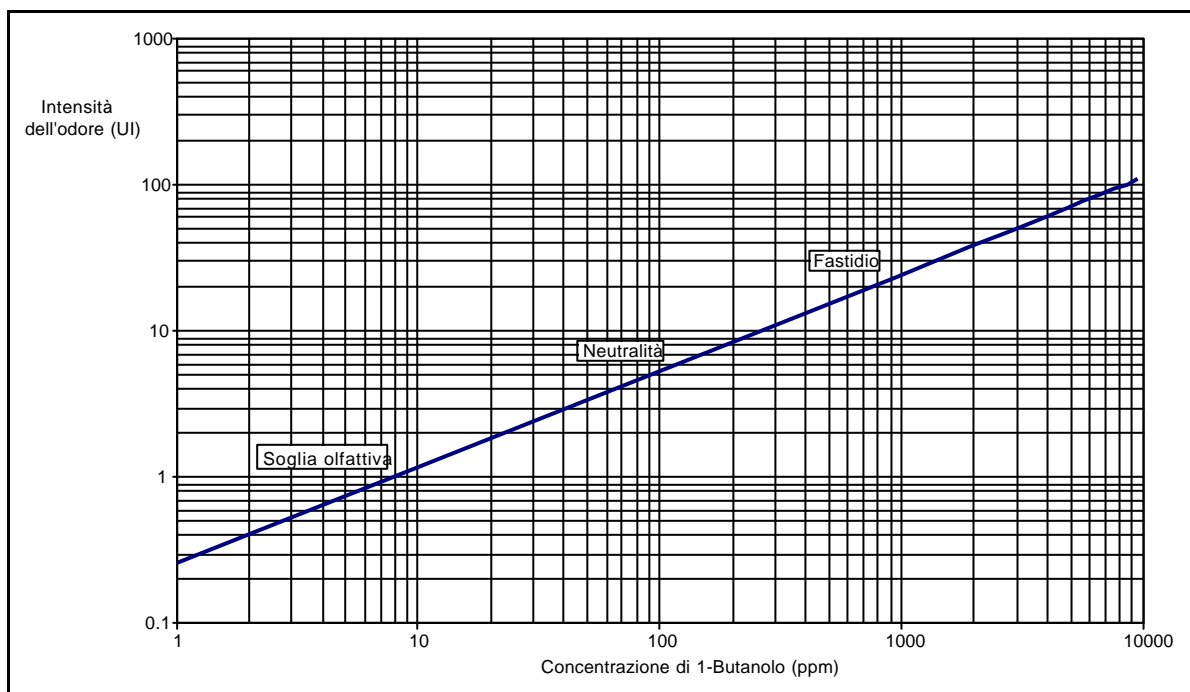


Figura 10 - Scala di riferimento del Butanolo per la misura dell'intensità della percezione olfattiva.

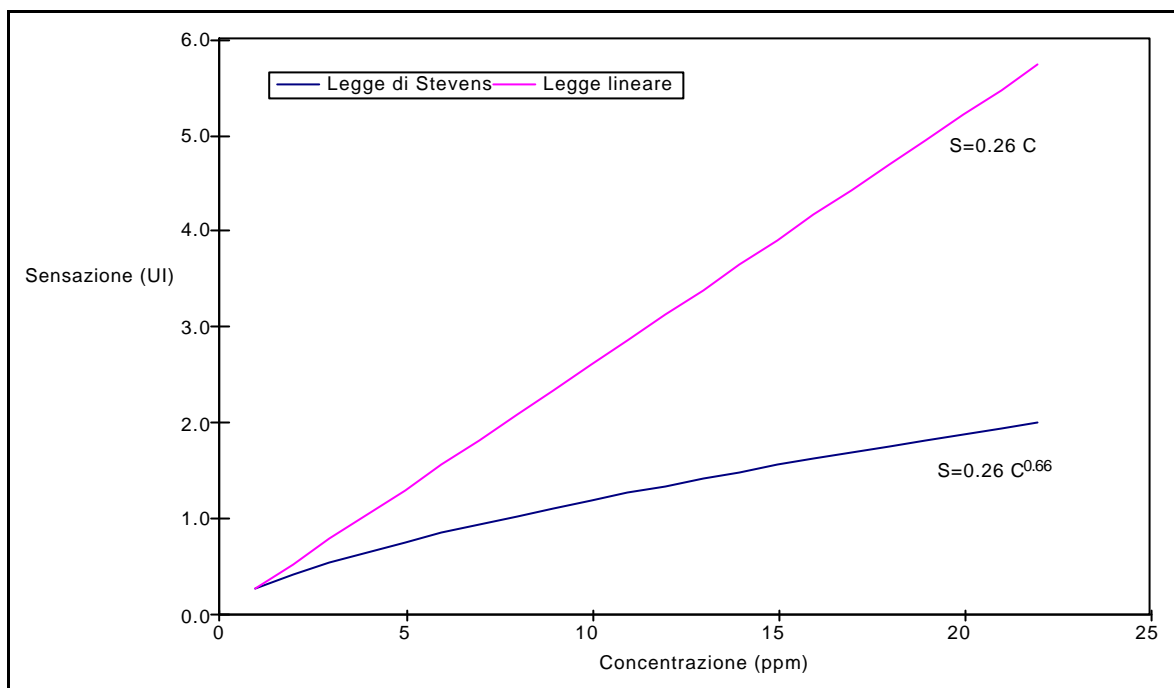


Figura 11 - Andamento della sensazione olfattiva in funzione della concentrazione.

## 6. Proposta di una metodologia rigorosa di analisi

Riportiamo nel seguito una proposta di metodologia riportata recentemente in letteratura (De Santoli et al., 1995) che, alla luce delle considerazioni riportate nel paragrafo precedente, consente di affrontare con un approccio più rigoroso il problema della determinazione della portata di ventilazione.

La procedura proposta può essere rappresentata per mezzo del diagramma di flusso riportato in figura 12.

In particolare gli autori, nel valutare la sensazione provocata dalla presenza di una sostanza nell'aria, analizzano sia il meccanismo fisico di diffusione che determina la concentrazione degli inquinanti che il meccanismo psicofisico di percezione sensoriale.

Per quanto riguarda il primo, la concentrazione  $C_i$  di un generico inquinante nella zona di fruizione dell'ambiente viene valutata, in regime stazionario, utilizzando le leggi di diffusione e di continuità:

$$C_i = C_{i,o} + \frac{q_i}{Qe_i} \quad (4.7)$$

in cui  $C_{i,o}$  è la concentrazione dell'inquinante nell'aria esterna,  $q_i$  la portata volumetrica di emissione dell'inquinante,  $Q$  la portata d'aria di ventilazione ed  $e_i$  l'efficienza di ventilazione.

A questo punto va verificato che la concentrazione di ogni inquinante risulti inferiore alla concentrazione limite stabilita da norme igienico-sanitarie:

$$C_i < C_{i,lim}$$

indipendentemente dalla sua percezione.

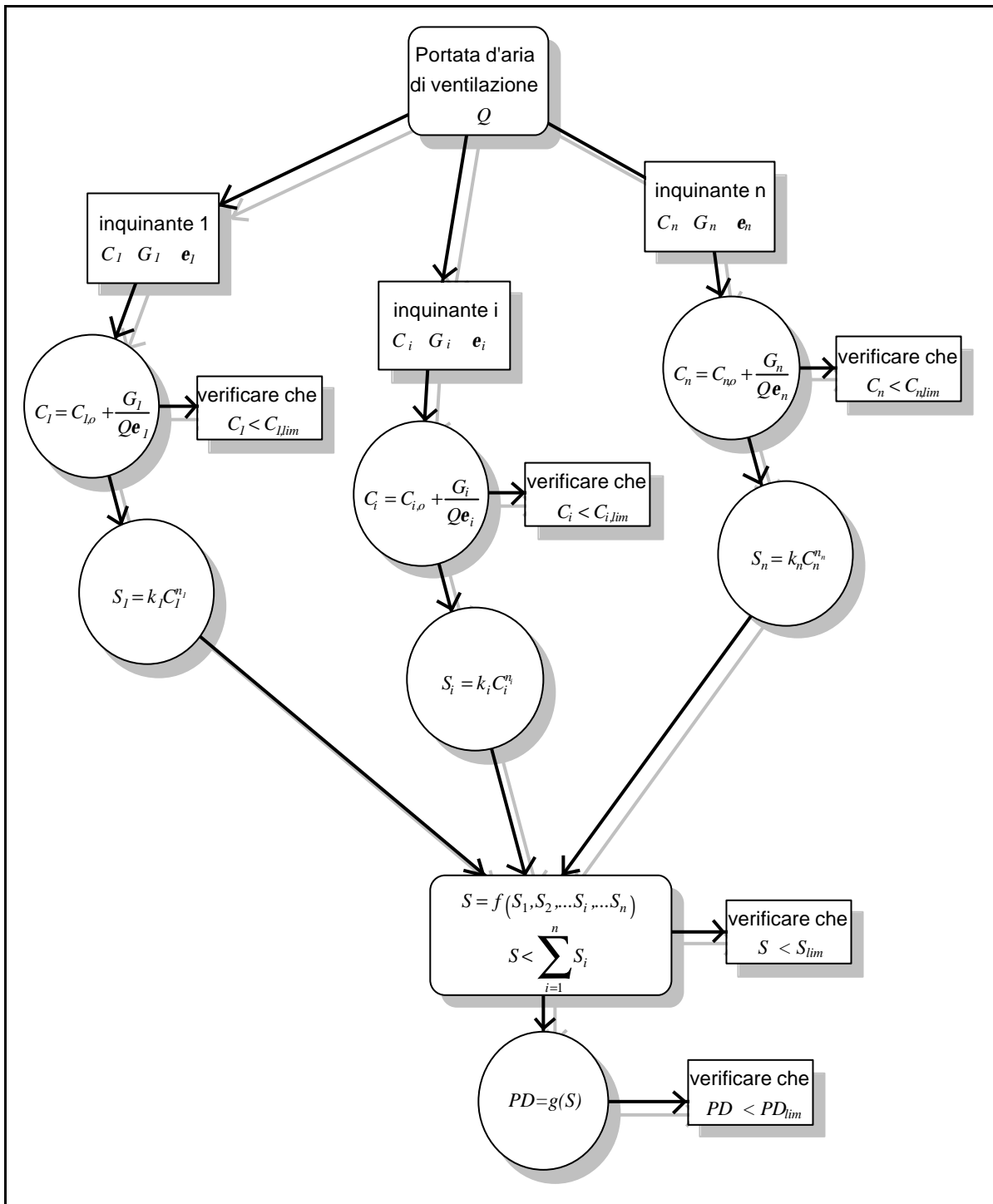


Figura 12 - Diagramma di flusso della procedura proposta da De Santoli et al., (1995) per la determinazione della portata di ventilazione.

Una volta effettuata questa verifica preliminare, il meccanismo psicofisico (che è molto più complesso di quello fisico ed ancora non è completamente noto) consente di risalire dalla concentrazione alla sensazione olfattiva e quindi di identificare la sensazione olfattiva prodotta complessivamente da tutti gli inquinanti.

La sensazione olfattiva andrà determinata, in base alla legge di Stevens, per ciascun inquinante identificato:

$$S_i = k_i C_i^{n_i}$$

e la sensazione totale percepita sarà quindi calcolata utilizzando una funzione ipoadditiva (la cui determinazione rigorosa è ancora oggetto di studio) del tipo:

$$S = f(S_1, S_2, \dots, S_i, \dots, S_n) \quad (4.8).$$

Per l'ipoadditività tale funzione dovrà essere tale che:

$$S < \sum_{i=1}^n S_i$$

ed inferiore ai limiti imposti.

Andrà a questo punto calcolata la percentuale di insoddisfatti, utilizzando una espressione formalmente analoga a quella già proposta da Fanger e riportata in figura 2, ma espressa in termini di Unità di Intensità e non di decipol:

$$PD = g(S) \quad (4.9)$$

e confrontata con il suo valore limite:

$$PD \leq PD_{lim}.$$

I concetti esposti possono essere sintetizzati schematizzando i vari passaggi necessari per mezzo di una procedura a step, che va differenziata a seconda che si tratti di una procedura di verifica o di progetto (per il dimensionamento della portata di ricambio).

In base a quanto detto nel paragrafo precedente, occorre innanzitutto definire un numero ridotto N di categorie di cattivi odori (ad esempio quelli *putridi*, quali gli odori corporali, quelli *pungenti*, quali gli odori di sigaretta, vernici, ecc.), individuando per ognuna di esse un inquinante di riferimento cui riferire le sensazioni olfattive ed effettuando l'ipotesi che al loro interno i vari tassi di emissione, una volta resi equivalenti, siano sommabili.

Va quindi definita un'opportuna funzione che, assumendo una legge ipoadditiva (ad esempio di composizione quadratica), definisca l'effetto risultante delle varie categorie di odori:

$$S = \sqrt{S_A^2 + S_B^2 + \dots + S_N^2} \quad (4.10)$$

Per ogni categoria, le varie fonti inquinanti vanno caratterizzate dal punto di vista sanitario per mezzo della portata di sostanze inquinanti pericolose e dal punto di vista olfattivo per mezzo della portata equivalente, ossia della portata riferita all'inquinante di riferimento che provoca la stessa sensazione olfattiva della sostanza inquinante reale. E' utile, a tal fine, redarre una tabella riassuntiva (vedi, ad esempio la tabella 20).

Tabella 20 - Esempio di possibile elenco di fonti e relativi tassi di emissione di inquinanti e di cattivi odori (De Santoli et al., 1995).

		Tasso di produzione di inquinanti (l/h)					Tasso di emissione odori	
Fonte	Unità	CO	NO <sub>x</sub>	HCHO	Radon	CO <sub>2</sub>	q <sub>A</sub>	q <sub>B</sub>
Persone	1							
Sigarette	1/h							
Arredi	m <sup>2</sup>							
Vernici	m <sup>2</sup>							
Tappeti	m <sup>2</sup>							
Cottura cibi	m <sup>2</sup>							
etc.								

#### Procedura di verifica

1. Si determina, per mezzo dell'equazione di diffusione, la concentrazione dei vari inquinanti:

$$C_i = C_{i,o} + \frac{\sum q_i}{Qe_i};$$

2. si verifica il rispetto della concentrazione limite:

$$C_i < C_{i,lim};$$

3. si valuta la concentrazione equivalente dei vari odori di riferimento. Supponendo di considerare due categorie (A e B) si ha:

$$C_A = C_{A,o} + \frac{\sum q_A}{Qe_A}; \quad C_B = C_{B,o} + \frac{\sum q_B}{Qe_B};$$

4. se ne determina la rispettiva percezione olfattiva:

$$S_A = k_A C_{A^A}^n; \quad S_B = k_B C_{B^B}^n;$$

5. si calcola la percezione olfattiva totale:

$$S = \sqrt{S_A^2 + S_B^2 + \dots + S_N^2}$$

6. si valuta la percentuale di insoddisfatti

$$PD = g(S).$$

*Procedura di progetto*

1. si definiscono i requisiti accettabili di qualità dell'aria, definendo sia il massimo valore accettabile per la percentuale di insoddisfatti che, per mezzo dell'espressione (4.9), la relativa massima percezione olfattiva;
2. si determina, per i vari odori di riferimento definiti, la concentrazione massima equivalente. Il valore massimo accettabile per la percezione olfattiva ed il rapporto

$$r = \frac{e_B \sum q_A}{e_A \sum q_B}$$

consentono di determinare, utilizzando il nomogramma riportato in figura 13, il valore massimo dell'aumento di concentrazione rispetto all'aria esterna per ognuno dei vari odori di riferimento:

$$\Delta C_A = C_A - C_{A,o}; \quad \Delta C_B = C_B - C_{B,o};$$

3. si calcola la portata d'aria Q:

$$Q = \frac{\sum q_A}{e_A \Delta C_A} = \frac{\sum q_B}{e_B \Delta C_B}.$$

*Figura 13 - Nomogramma esemplificativo (con  $n_B < n_A$ ) per la determinazione dell'aumento massimo di concentrazione rispetto all'aria esterna.*



## **CAPITOLO V: STRATEGIE DI DIAGNOSTICA E CONTROLLO DELLA QUALITA' DELL'ARIA INDOOR**

Si è visto che l'inquinamento indoor si presenta come una forma di inquinamento estremamente complessa per l'elevato numero di sorgenti di emissione presenti in spazi ristretti e la conseguente elevata presenza di sostanze inquinanti.

Tale particolare carattere, unito alla forte variabilità delle concentrazioni delle diverse sostanze, comporta che il controllo dell'aria indoor vada affrontato con approcci differenti da quelli usualmente utilizzati negli edifici industriali, nei quali i lavoratori sono in genere quotidianamente esposti a poche sostanze chimiche, utilizzate routinariamente nei processi di produzione e quindi ben note, per cui risulta relativamente semplice controllarle.

Conseguentemente per tali ambienti è possibile adottare un'impostazione che consiste nella definizione di valori di soglia (TLV) per le concentrazioni delle diverse sostanze inquinanti presenti.

Negli ambienti indoor invece il controllo viene realizzato adottando differenti impostazioni normative, volte rispettivamente al contenimento dei fattori che determinano la concentrazione degli inquinanti ed all'adozione di opportuni tassi di ventilazione, atti a mantenere i livelli di concentrazione delle principali sostanze inquinanti al di sotto di opportuni valori guida consigliati, diluendo i carichi inquinanti prodotti dalle diverse sorgenti presenti nell'ambiente.

In parte tale modo di procedere viene utilizzato anche nel controllo dell'inquinamento nell'ambiente esterno: ad esempio l'emissione di sostanze inquinanti da parte di mezzi di trasporto e centrali elettriche è regolata da norme che intervengono sia su fattori come i processi di combustione, che imponendo limiti di concentrazione per gli inquinanti emessi nell'acqua e nell'aria.

Per gli edifici di nuova costruzione vengono inoltre previsti interventi preventivi sulla progettazione e la costruzione di strutture ed arredi.

Attualmente, tuttavia, è il patrimonio edilizio esistente quello che necessita di maggiori attenzioni. I dati disponibili indicano che in Europa e negli Stati Uniti il 20% circa degli immobili esistenti manifesta gravi situazioni di insalubrità dal punto di vista della qualità dell'aria interna, indipendentemente dalla loro età, ma che in generale almeno il 50% del patrimonio edificato necessita di qualche intervento di bonifica.

L'inquinamento di cui soffrono gli edifici è attribuibile, per la gran parte, all'adozione nel processo produttivo di sostanze, materiali e manufatti non sufficientemente sperimentati sotto il profilo delle emissioni (un esempio è costituito dai trattamenti di facciata, che sigillando le murature ne hanno impedito la traspirazione, provocando le note conseguenze di umidità eccessiva, condense, muffe, ecc.).

Nell'ambito delle operazioni di bonifica, il controllo delle emissioni è realizzabile intervenendo sui fattori che determinano i tassi di emissione, identificando e controllando le fonti inquinanti, eliminando, ove possibile, tutti i materiali e le sostanze la cui tossicità e pericolosità è accertata ed adottando tutti gli accorgimenti che migliorino le condizioni ambientali interne.

Il controllo della ventilazione, che rappresenta il meccanismo più efficace per diluire le concentrazioni di inquinanti a livelli accettabili, consente invece di ottenere gli stessi risultati per mezzo di opportuni valori dei tassi di ventilazione e quindi di un adeguato numero di ricambi d'aria.

Controlli vanno effettuati anche sull'umidità: gli studi condotti indicano che il minimo delle emissioni nella gran parte dei materiali si constata in ambienti con valori di umidità compresi fra il 40 ed il 60%.

La gran parte delle operazioni descritte risulta tecnicamente praticabile anche in ambienti non dotati di impianto di climatizzazione ed il suo costo nella maggior parte dei casi è abbordabile.

Va infine tenuto presente che, anche in seguito all'adozione di tali provvedimenti, ci si troverà comunque di fronte ad una sorta di "zoccolo duro" dell'inquinamento, dovuto alle emissioni non eliminabili, contro il quale non si può intervenire se non con provvedimenti legati alla morfologia degli ambienti.

Per le strutture di nuova costruzione, invece, la strategia di approccio è completamente diversa e consiste essenzialmente nella predisposizione di interventi di prevenzione adottabili in fase di progettazione.

A tal fine è necessario definire preliminarmente un nuovo corpo di leggi e regolamenti che investa la maggior parte dei comparti produttivi e delle norme urbanistiche.

Un altro aspetto da investire è quello della morfologia degli edifici e dell'igiene edilizia. Anche in quest'ambito dovranno essere definite norme urbanistiche adeguate, apportate modifiche ai regolamenti edilizi comunali per consentire nuove edificazioni sane, ma anche per favorire programmi di bonifica.

In un'ottica di prevenzione fondamentale risulta riformulare la normativa esistente in campo edilizio per ridurre la probabilità che strutture di nuova costruzione presentino elevati livelli inquinanti.

E' essenziale, a tal fine, definire criteri specifici per la progettazione, la costruzione e la fruizione di nuovi stabili che garantiscano accettabili livelli di qualità dell'aria.

In generale l'obiettivo fondamentale da perseguire è la redazione di tabelle contenenti, per i materiali più comuni, i relativi valori in olf, utilizzabili da architetti ed ingegneri per selezionare, in fase di progetto, materiali a bassa emissione.

Sarebbe oltremodo utile allo scopo poter disporre di quantificazioni dei valori in olf dei rispettivi prodotti da parte delle ditte produttrici di materiali edili e di arredamento.

Per i materiali da costruzione andrebbero inoltre elaborate e varate norme che fissino soglie di emissioni nocive; per le vernici ed i materiali plastici norme per la corretta applicazione; per i manufatti in genere andrebbero previste stagionature per fare avvenire la maggior parte delle emissioni prima della messa in commercio, ecc.

Per pervenire a tali risultati si è detto tuttavia che la ricerca deve ancora chiarire diversi aspetti, che vanno dall'analisi delle caratteristiche di emissione e dei meccanismi di distribuzione all'identificazione delle sostanze inquinanti emesse e delle tipiche concentrazioni associate, alla caratterizzazione della tossicità dei singoli inquinanti e di quella dovuta ad effetti combinati. Ciò nell'ottica di effettuare stime dell'esposizione e del rischio, anche in relazione alle caratteristiche della ventilazione, valutando sia gli effetti di un'esposizione a lungo periodo a basse concentrazioni che quella ad elevate concentrazioni nel breve periodo.

Il conseguimento di tali risultati consentirà, fra l'altro, anche una più rapida ed esatta identificazione dei casi di intervento.

## **1. Tecniche di riduzione delle emissioni inquinanti**

Per quelle situazioni che necessitano di specifici interventi esistono al momento parecchie tecniche utilizzabili al fine di limitare le emissioni di sostanze inquinanti, differenti fra loro per concezione ed efficacia e più o meno specificamente rivolte al controllo dei principali fattori noti che influenzano la concentrazione dei più comuni inquinanti interni.

Tali tecniche consistono essenzialmente nella rimozione o riduzione delle sorgenti inquinanti, nel loro isolamento o in alcune modificazioni dell'ambiente.

Le tecniche di rimozione o riduzione di una fonte inquinante agiscono in primo luogo limitando le emissioni alla sorgente, visto che è soprattutto il tasso di immissione nell'ambiente a determinare il livello di concentrazione all'interno.

Spesso lo stesso risultato viene raggiunto ricorrendo ad un'altra tecnica, molto diffusa, che è l'isolamento di una sorgente e consiste nella sigillazione delle apparecchiature o superfici che generano contaminanti.

Ad esempio, per quanto riguarda gli apparecchi di combustione, la rimozione delle fonti inquinanti comporta l'eliminazione dello scarico diretto in ambiente o la dotazione degli apparecchi (soprattutto di quelli per il riscaldamento di acqua calda ad uso domestico) di dispositivi di ventilazione e sicurezza. Ma essa può comportare anche il dimensionamento e la corretta realizzazione dei bruciatori e dei condotti di scarico (soprattutto per impianti di riscaldamento e fornelli a gas), prevedendo aperture di alimentazione dell'aria di combustione, focolai stagni o l'adozione di dispositivi per il controllo delle condizioni di combustione e l'interruzione del processo in caso di anomalie di funzionamento.

Per quanto riguarda invece l'immissione di radon negli edifici, la rimozione (che in tal caso coincide con l'isolamento) della sorgente può realizzarsi sigillando crepe ed intercapedini nell'edificio (soprattutto nei garage), al fine di evitare infiltrazioni di gas dal sottosuolo verso gli ambienti occupati.

Ulteriori soluzioni prevedono l'installazione di opportuni dispositivi di estrazione dell'aria sotto le fondamenta (sistemi di condutture o ventole) o l'utilizzo di pozzetti di raccolta del gas sotto il pavimento, o ancora la verniciatura dell'edificio con speciali materiali di basso costo impermeabili ai gas.

Anche per quanto riguarda l'infiltrazione dei gas di discarica, la sigillazione dell'edificio o la creazione di sistemi di dispersione (quali le cavità ventilate nei sottofondi) che consentono di mantenere una giusta differenza di pressione fra esterno ed interno, si rivelano tecniche efficaci.

Infine, le emissioni di formaldeide si possono limitare modificando i processi di produzione.

Diverso è l'approccio che si utilizza adottando tecniche miranti alla modificazione dell'ambiente. Esse sono indirizzate prevalentemente ai contaminanti biologici e sono volte a creare condizioni inospitali per la loro generazione, tramite il controllo delle condizioni termogrometriche.

Un metodo alternativo di controllo viene utilizzato adottando tecniche che mirano all'eliminazione fisica dei gas e delle particelle presenti in sospensione in aria per mezzo di sistemi di filtri e precipitatori elettrostatici.

Tali metodi, per quanto risultino efficaci per le particelle di origine biologica (che sono più controllabili perchè necessitano di particolari condizioni termogrometriche per proliferare), non si dimostrano completamente soddisfacenti quando si tratti di eliminare gli inquinanti chimici o radioattivi: infatti, ad esempio nel diminuire la concentrazione totale dei prodotti del decadimento del radon i sistemi di filtri ed i precipitatori elettrostatici (che rimuovono le particelle in sospensione caricandole elettricamente) aumentano la frazione di tali prodotti non inclusa nelle particelle, e sembra che proprio tale frazione sia responsabile del rilascio delle dosi maggiori di radiazioni:

pertanto, pur riducendo la concentrazione totale di prodotti di decadimento, non si riduce necessariamente l'esposizione alle radiazioni.

Inoltre tali tecniche presentano limitazioni di carattere economico, poichè drastiche riduzioni della concentrazione di inquinanti richiedono elevati tassi di depurazione dell'aria, per cui frequentemente si verifica che molti fra i depuratori da tavolo più diffusi ed economici operino a velocità molto basse e generalmente inadeguate.

Fondamentale nei casi di intervento risultano comunque le caratteristiche della ventilazione, che può essere sfruttata per rimuovere i contaminanti, qualora ne vengano opportunamente controllati i rapporti di pressione (ad esempio tramite la regolazione dei flussi d'aria, l'installazione di scarichi vicino alle sorgenti o ricorrendo a tecniche a tenuta d'aria, che consentono di mantenere differenziali di pressione ed eliminare i percorsi di collegamento fra sorgente ed occupanti).

Utilizzando sistemi di ventilazione è necessario sempre adottare una certa cautela, per evitare il generarsi di depressioni dell'aria interna, fenomeno che favorirebbe le infiltrazioni dall'esterno (da evitare in caso di radon) o impedirebbe la fuoriuscita di gas dall'interno (ad esempio dei gas tossici attraverso le canne fumarie in caso di scarico in interno dei prodotti di combustione).

Talora il costo di un'adeguata ventilazione risulta tuttavia competitivo con quello della riduzione alla fonte degli inquinanti: ciò nonostante, in tutti quei casi in cui non è possibile l'identificazione delle sorgenti il ruolo da essa svolto risulta fondamentale.

## **2. Figure giuridiche responsabili**

Al momento non risulta ancora completamente chiarito quali siano le varie figure preposte all'attuazione delle strategie di controllo. Le parti direttamente interessate sono diverse e vanno dalle autorità nazionali e locali alle organizzazioni professionali, ai produttori di materiali da costruzione e di arredi, ai costruttori ed agli imprenditori edili.

Seppur non direttamente, dovrebbero sentirsi coinvolti anche tutti coloro che in qualche misura si occupano di ambiente, sanità, architettura, ingegneria, energia, ecc. ed i cittadini stessi: il successo di un programma di controllo dell'inquinamento dipende infatti, in misura non marginale, anche dagli amministratori e dagli occupanti dell'edificio.

Al fine di poter individuare precise catene di responsabilità, che vadano dagli ingegneri, architetti e costruttori fino ai proprietari e gli inquilini, alcuni paesi stanno valutando l'istituzione di documentazione specifica, associata ad ogni edificio, avente valore legale e riportante le specifiche di progetto relative alla qualità dell'aria negli interni e le eventuali variazioni effettuate nella destinazione d'uso o apportate agli impianti di ventilazione.

## **3. Indagini sulla qualità ambientale interna per mezzo di questionari**

Nell'ambito delle strategie di diagnostica e controllo della qualità dell'aria interna di un edificio particolare importanza rivestono le indagini condotte per mezzo di questionari allo scopo di raccogliere informazioni dagli occupanti riguardo le cause di disturbo e le sintomatologie associabili alla fruizione dell'edificio stesso. Le informazioni in tal modo ottenute, oltre a segnalare eventuali situazioni di rischio, risultano inoltre, in alcuni casi, l'unica tecnica perseguibile per determinare il carico di inquinamento totale di un ambiente ai fini di determinarne il tasso di ventilazione.

L'insieme di tali indagini va ovviamente collegato al naturale ciclo di vita dell'edificio, durante il quale varia la probabilità di rischio dei diversi fattori.

In un edificio nuovo, ad esempio, il rischio è dovuto prevalentemente ai materiali da costruzione, ai mobili e agli arredi; c'è inoltre forte presenza di muffa e di polveri. In un arco di tempo variabile fra sei mesi ed un anno invece tali fattori diminuiscono notevolmente la loro incidenza di rischio, mentre l'edificio gradatamente inizia a deteriorarsi: i tappeti si sporcano, gli impianti di climatizzazione necessitano di revisione e si generano sempre più fattori contaminanti. Per tale ragione la compilazione di questionari va effettuata periodicamente, preferibilmente adottando metodologie standardizzate.

A tale indagine condotta sugli occupanti vanno poi possibilmente associate accurate ispezioni da effettuare sull'edificio e sul sistema di ventilazione e misure da condurre su alcuni fattori indicatori di rischio.

In generale, una strategia complessiva di indagine dovrebbe prevedere le seguenti fasi:

### *3.1. Questionario per indagini sul clima interno:*

il cui scopo è quello di raccogliere informazioni dagli occupanti riguardanti le condizioni ambientali, le cause del discomfort e le sintomatologie manifestate, per poi confrontarle con quelle relative a situazioni standard.

Generalmente un questionario contiene domande di tipo diverso che variano da quelle più generali sulla qualità dell'ambiente (domande sulla presenza di odori, sulla freschezza dell'aria, sulle condizioni termiche, sulla presenza di rumori, ecc.), a quelle riguardanti le condizioni psicologiche, a quelle, infine, sulla presenza di malesseri più o meno gravi (irritazioni agli occhi, mal di testa, ecc.).

Sulla base delle informazioni richieste, gli occupanti l'edificio in oggetto potranno essere suddivisi in gruppi con riferimento, ad esempio, agli spazi in esso occupati, al tempo di permanenza, ecc..

Potranno inoltre essere stilate versioni diverse a seconda della destinazione d'uso dell'edificio (abitazione, ufficio, ospedale, scuola, ecc.).

Un esempio di possibile scheda di indagine, sviluppata al *Department of Occupational and Environmental Medicine* di Örebro in Svezia (Andersson et al., 1993) ed indirizzata ad ambienti di lavoro, è riportata in figura 14. In particolare si osserva come la scheda in basso a destra sia specificamente rivolta ad aspetti psicosociali: tale parte del questionario costituisce infatti una scheda aggiuntiva, elaborata per successive utilizzazioni in una versione rivista del questionario stesso.

E' evidente come in esso vengano richieste informazioni, oltre che sulla persona che lo compila (2), anche su fattori fisici ambientali (3), aspetti psicosociali legati al posto di lavoro (4), l'anamnesi del soggetto (5), i sintomi generalmente riportati (6), possibilmente associati alla fruizione dell'edificio (7). La scheda in formato originale è riportata in Appendice.

In generale le risposte ottenute forniscono informazioni abbastanza precise sull'eventuale presenza di sostanze in concentrazioni superiori ai valori limite.

Pertanto, nel valutare le risposte è essenziale individuare correlazioni fra l'andamento dei fattori ambientali che arrecano disturbo e quello dei sintomi manifestati.

A tal fine è utile adottare una rappresentazione grafica che riporta la frequenza delle risposte in relazione ai diversi fattori ed alle varie sintomatologie, confrontandola con alcuni valori di riferimento (fig. 15) (Andersson et al., 1993).

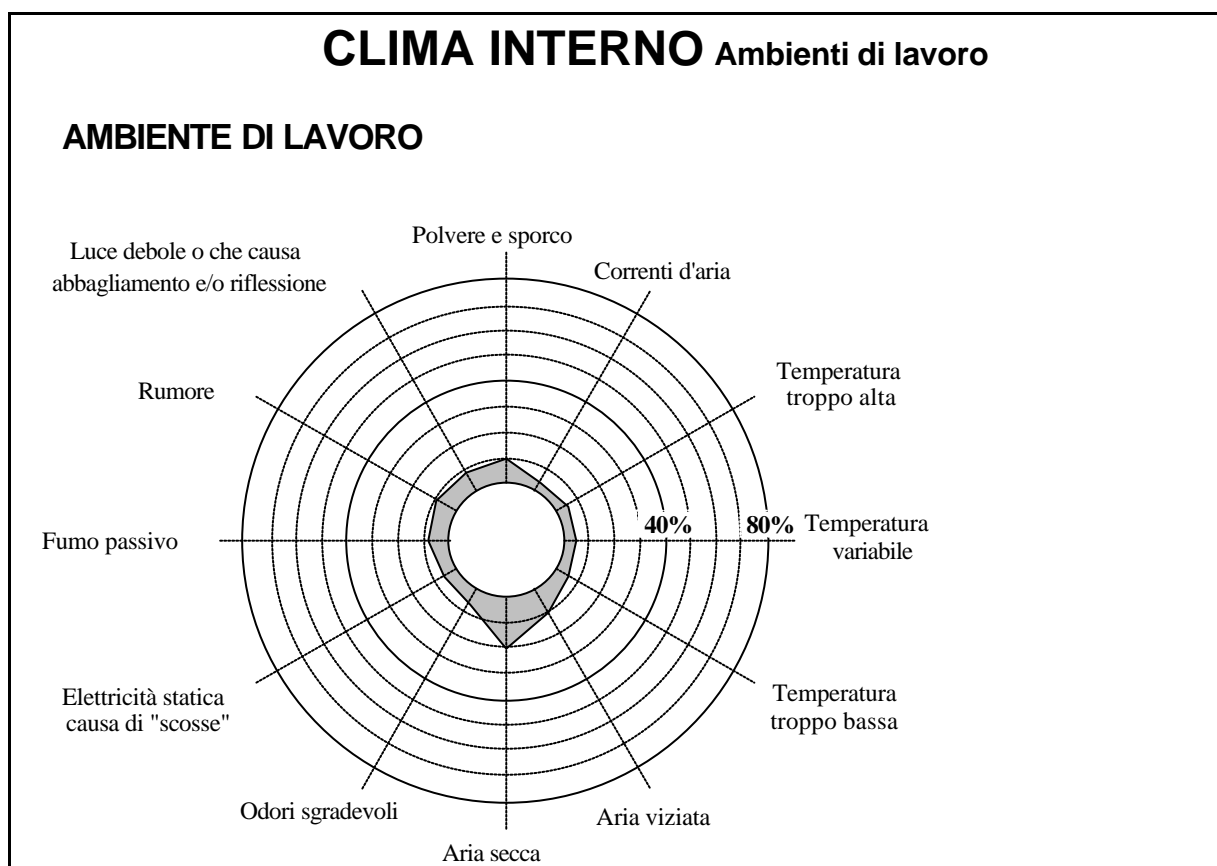
Una volta apportate all'ambiente le appropriate misure correttive, dedotte in seguito ai risultati ottenuti dall'indagine, è opportuno sottoporre gli occupanti ad un secondo test, da effettuare

possibilmente nell'arco dello stesso anno, regolandolo in maniera tale da poter confrontare i risultati ottenuti nei due casi.

*3.2. Descrizione tecnica dello stabile e dei relativi servizi:*

riguardante il progetto e la sistemazione dell'edificio. Le informazioni riguarderanno più specificamente la struttura edilizia, gli arredi, i servizi meccanici, ecc..

Figura 14 - Esempio di scheda d'indagine rivolta ad ambienti di lavoro.



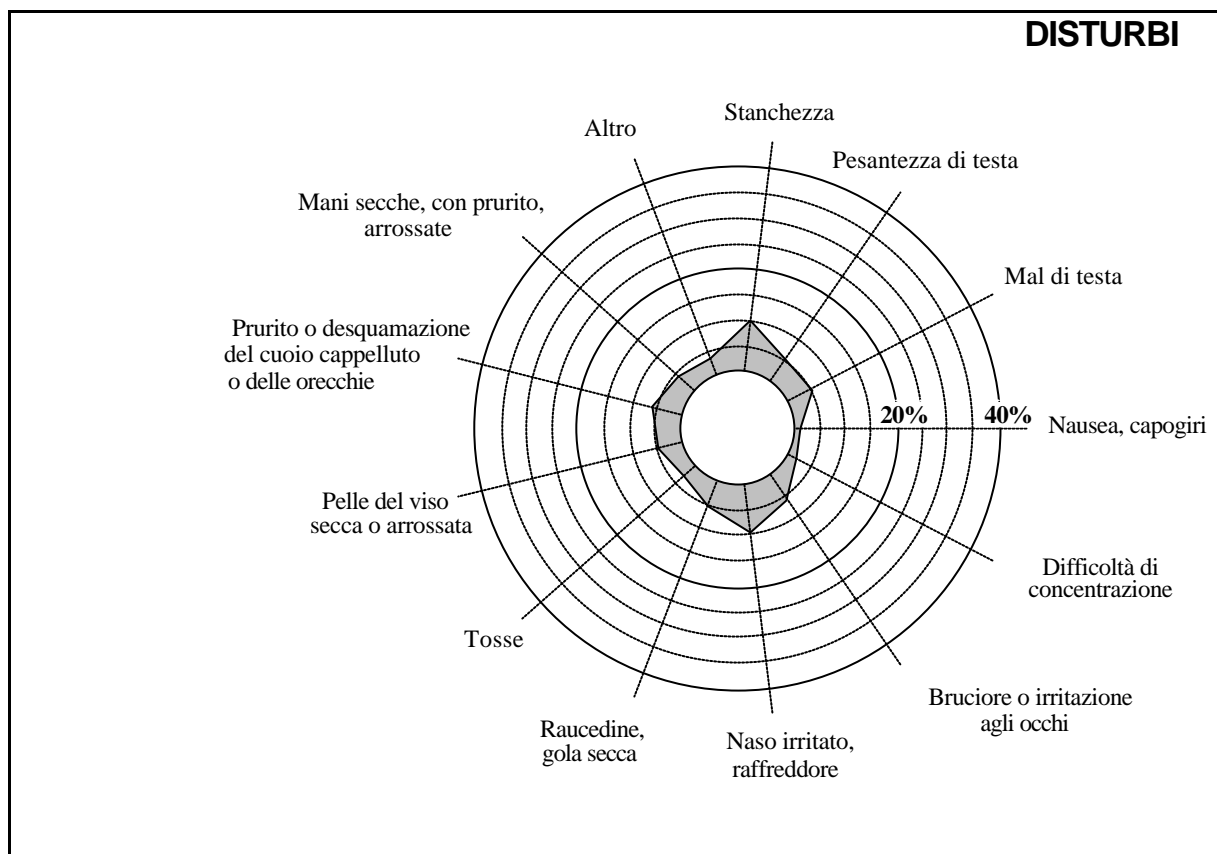


Figura 15 - Rappresentazione per mezzo di grafico "spider" della distribuzione dei giudizi sui fattori ambientali che arrecano disturbo e delle sintomatologie manifestate.

### 3.3. Indagine sull'edificio e sulle sue condizioni operative:

comporta l'esame dello stato della struttura edilizia, ma anche delle condizioni operative ed igieniche dell'edificio, del suo uso e delle modalità di fruizione da parte degli occupanti, fornendo indicazioni sulle attività che vi svolgono (compreso il fumo).

Ove possibile a tali interventi di diagnostica vanno affiancate indagini di controllo dell'esposizione, quali ad esempio la catalogazione delle attività che producono contaminanti.

### 3.4. Analisi delle caratteristiche di ventilazione.

Le caratteristiche della ventilazione vanno esaminate in dettaglio, ispezionando gli impianti con particolare riguardo alle superfici scaldanti, agli scambiatori di calore ed agli umidificatori, ai flussi di estrazione ed alla loro regolazione, ma anche controllando l'esistenza di eventuali fratture meccaniche, ostruzioni dei filtri, ecc..

Vanno controllati inoltre l'efficienza di ventilazione, i suoi tassi e la sua distribuzione per unità di area e di occupanti, i flussi d'aria fra i vari ambienti, la proporzione di aria ricircolata, verificando se il ricambio d'aria produce una sufficiente diluizione, anche in presenza di fumo.

Va esaminata infine anche la qualità dell'aria esterna.



### 3.5. Misure di alcuni fattori indicatori;

Estremamente importanti risultano controlli e misure dei valori assunti da alcuni fattori che, se presenti e con particolari concentrazioni, si comportano da indicatori di eventuali situazioni di rischio.

Ad esempio, la concentrazione di biossido di carbonio rappresenta un indicatore legato al numero di persone presenti ed al loro tempo di permanenza nell'ambiente; il monossido di carbonio è invece associato al fumo di tabacco ed all'inquinamento dell'aria esterna.

In generale, l'attenzione dovrebbe essere rivolta almeno ai seguenti fattori:

- ### odori;
- ### temperatura alta o variabile;
- ### polvere e sporcizia;
- ### umidità e muffa;
- ### concentrazione di biossido di carbonio;
- ### fumo di tabacco.

In caso di sospetta presenza di sostanze irritanti (gas o vapori) o odori di origine non identificabile, ulteriori misurazioni possono effettuarsi controllando la concentrazione dei vari gas e vapori organici (particolarmente della formaldeide) affiancando a tali rilievi, ove possibile, test olfattivi.

Andrebbero inoltre effettuate valutazioni dei fattori fisici che si sospetta abbiano un effetto di trigger sui sintomi del clima.

Come i questionari, anche l'insieme di tali indagini va ripetuto periodicamente.

## 4. Abaco per la determinazione del massimo carico di inquinamento tollerabile in un edificio

Nell'ambito degli strumenti di analisi di qualità dell'aria utilizzabili nella progettazione o ristrutturazione di un edificio, nel seguito viene descritta una procedura grafica sviluppata, fra gli altri, dagli stessi autori, che consente la determinazione del carico massimo (in olf) che un edificio può sopportare, nelle reali condizioni di occupazione (fumatori inclusi) e ventilazione e con riferimento ai livelli di qualità percepita dell'aria, sia interna che esterna (Costanzo et al., 1995).

Il metodo proposto può essere agevolmente utilizzato per una prima rapida valutazione delle condizioni di qualità dell'aria all'interno degli ambienti, consentendo di determinare il carico inquinante residuo da poter assegnare ai materiali edilizi, all'arredamento ed al sistema di ventilazione.

Tale valore rappresenta pertanto un parametro indicatore, utilizzabile per individuare soluzioni ambientalmente più idonee.

Nel seguito la procedura sarà illustrata, in particolare, con riferimento al semplice caso di un ambiente appartenente ad un edificio commerciale, occupato durante le ore di lavoro da un solo fumatore.

Risolvendo l'equazione del comfort rispetto al carico di inquinamento totale G (numero complessivo di olf) otteniamo:

$$G = \frac{Q_c (C_i - C_o)}{10} e_v$$

che rappresenta l'ammontare complessivo di inquinamento chimico che può sussistere in un ambiente, mantenendovi le condizioni di comfort.

Nell'equazione precedente i tassi di ventilazione  $Q_c$  si assumono noti e valutabili, nei processi di audit, per mezzo di indagini di campo (ad esempio col metodo dei gas traccianti) o ricorrendo ai vari metodi disponibili (ASHRAE, 1989; BREEZE, 1991; COOLit; UNI, 1974) mentre in fase di progetto possono assumersi pari ai valori proposti dagli standard correnti (ad esempio, 7.5 l/s per persona).

Per la definizione del livello di qualità percepita dell'aria esterna si può fare invece riferimento alla figura 9 precedentemente riportata.

Sinteticamente, l'utilizzo del diagramma, che è riportato in figura 16, può essere illustrato per mezzo della seguente procedura a step:

1. misura o determinazione del tasso di ventilazione  $Q_c$  (l/s): punto A;
2. definizione del livello di qualità dell'aria interna (vedi tab. 12);
3. valutazione del livello di qualità dell'aria esterna (vedi tab. 13 e fig. 9): punto B;
4. valutazione dell'efficacia di ventilazione: punto C;
5. determinazione del carico massimo ammissibile per l'ambiente: punto D;
6. individuazione del punto E sulla linea tratteggiata corrispondente a 0 olf (tale retta rappresenta il luogo dei punti in cui il carico massimo ammissibile è solo quello generato dagli occupanti);
7. definizione del numero di occupanti sul semiasse negativo dell'asse verticale (punto F);
8. individuazione del punto G sulla semiretta obliqua corrispondente alla percentuale di fumatori presenti;
9. tracciamento di due rette aventi origine nei punti E e G, parallele rispettivamente ai semiassi negativi x ed y: le rette si intersecano nel punto H;
10. la retta interpolante passante per H, parallela alle linee tratteggiate, individua sulla bisettrice del III quadrante un valore che indica il numero massimo di olf attribuibili al sistema edificio-impianto che consente di mantenere, con i tassi di ventilazione effettivamente presenti, condizioni di comfort (il valore del carico G ottenibile dall'espressione analitica sopra riportata).

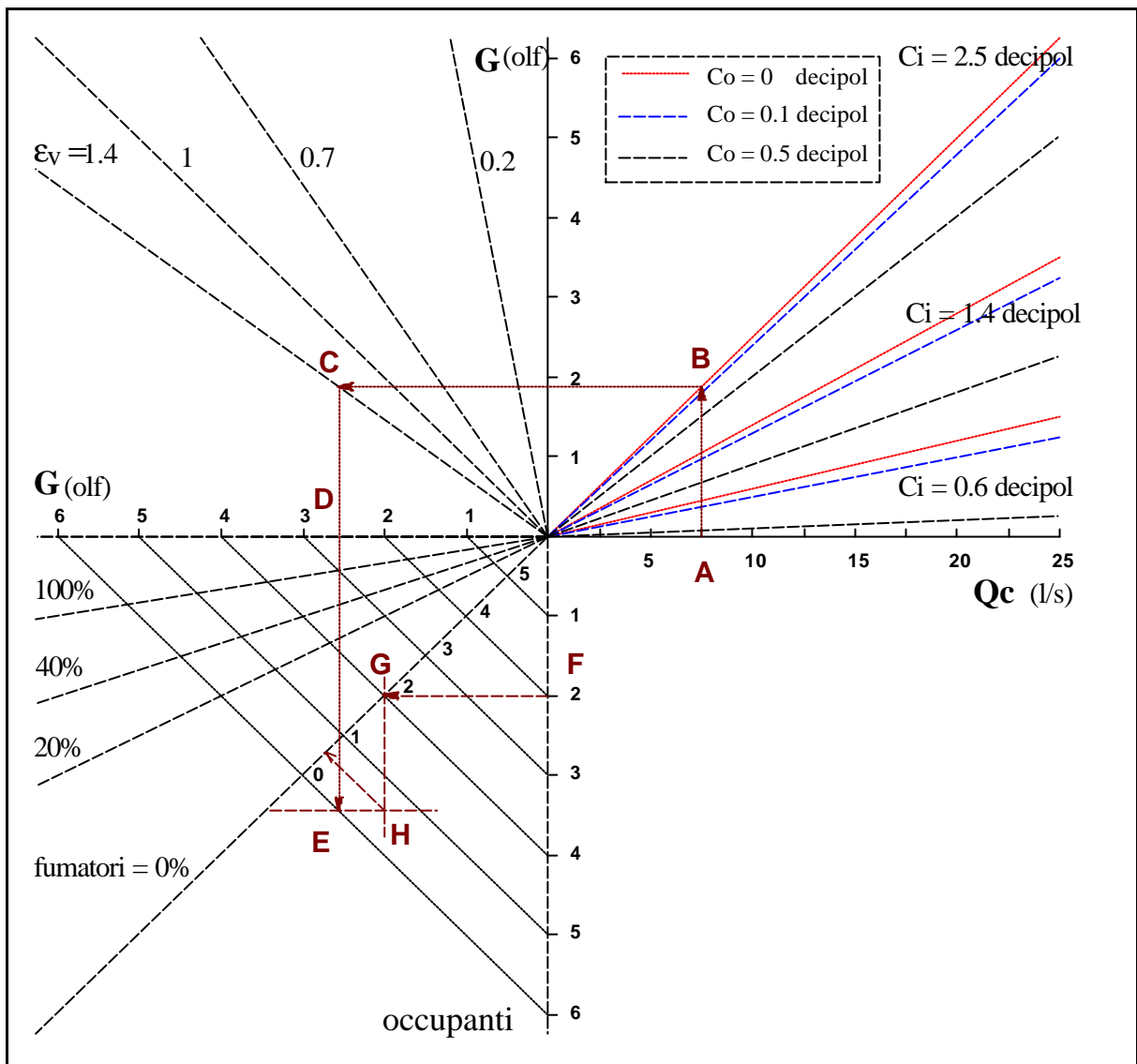


Figura 16 - Abaco per la determinazione del massimo carico inquinante tollerabile in un edificio.

Qualora il punto P venga a cadere dalla parte sinistra della retta a 0 decipol, il numero massimo di df ammissibili per l'ambiente risulta inferiore anche solo al numero di olf originati dagli occupanti, per cui è necessario intervenire diminuendo i tassi di occupazione o modificando i materiali utilizzati per le rifiniture o gli arredi o ancora agendo sulla ventilazione, aumentandone i tassi.

## **CAPITOLO VI: METODOLOGIE DI DIAGNOSTICA E MISURA DELLA QUALITÀ DELL'ARIA**

### **1. Misure di qualità dell'aria**

Come si è visto, la valutazione della qualità dell'aria di un ambiente confinato non adibito ad attività industriali è correlata non soltanto al tipo ed alla concentrazione delle sostanze aerodisperse, ma anche alle sensazioni che l'aria respirata provoca sugli occupanti, indipendentemente dalla sua composizione chimica. Effettuando misure sull'aria di un ambiente è pertanto importante verificare non soltanto le sue caratteristiche di salubrità, ma anche il suo gradimento da parte degli occupanti.

Per questi motivi la determinazione della qualità dell'aria indoor è attualmente affidata a due differenti tecniche di misura, fra loro complementari, che attengono all'analisi chimica ed alla percezione da parte dei sensi delle persone.

La percezione umana, in particolare, è di grande aiuto soprattutto nelle fasi iniziali di un'indagine, poichè consente di segnalare la presenza di eventuali situazioni a rischio, non sempre diagnosticabili a tutt'oggi per mezzo di analisi chimiche, oppure a conclusione della stessa, per accertare che le misure di rimedio attuate abbiano avuto successo.

L'analisi basata sulla percezione dei sensi è inoltre importante per evidenziare effetti sinergici di contaminanti non tenuti in conto o addirittura sconosciuti, come può accadere quando l'aria percepita non si presenta ad un livello accettabile di qualità, pur se le apparecchiature rilevano livelli bassi di concentrazioni di inquinanti: come già visto, accade infatti di frequente che in ambienti in cui l'analisi di tipo chimico stabilisce che nessuna delle concentrazioni di inquinanti supera i limiti ammissibili, il giudizio espresso dagli occupanti sulla qualità dell'aria interna non sia positivo.

Ciò denota le attuali scarse conoscenze sugli effetti combinati di contaminanti differenti, evidenziando, in generale, l'incertezza che riguarda ancora il fenomeno nel suo complesso, con particolare riferimento alla gamma completa dei parametri che lo caratterizzano, ed al legame causa-effetto: si è già detto, infatti, che non è ancora completamente chiaro il rapporto fra tipologia di inquinante, concentrazione, tempo di esposizione ed effetti sulle persone, acuti e/o cronici.

Per tali ragioni, in attesa che venga sviluppata strumentazione idonea in grado di misurare direttamente le sensazioni percepite dagli esseri umani (come avviene in altre branche della scienza quali l'acustica con i *fonometri* o in illuminotecnica con i *luxmetri*) si continua, accanto alle strumentazioni di analisi, ad utilizzare l'uomo come strumento di misura.

Altri tipi di misure riferite agli occupanti riguardano l'uso di questionari contenenti domande sulla qualità dell'aria, in termini di freschezza, odori, di sintomi di malessere o di disagio, ecc. (anche se in questo caso più che di misure, si dovrebbe parlare di informazioni) ed il ricorso ad analisi cliniche sui fluidi corporali.

Tuttavia, quando si avverte una variazione nella composizione naturale dell'aria di un ambiente interno rimane sempre di estrema importanza determinare quantitativamente la sostanza estranea che l'ha provocata o il componente la cui concentrazione è stata alterata.

Inoltre alcune sostanze devono essere necessariamente rilevate strumentalmente, non essendo percepibili dall'olfatto perché inodore o per il loro elevato livello di pericolosità per l'uomo.

Infine, bisogna sempre considerare che l'odorato di una persona è soggettivo e può essere più sensibile a certi inquinanti piuttosto che ad altri.

In tutti tali casi risulta ovviamente di fondamentale importanza poter disporre di una quantificazione precisa, effettuando analisi chimiche dei campioni prelevati.

La determinazione delle concentrazioni dei singoli inquinanti per mezzo di analisi chimica è più semplice dal punto di vista concettuale rispetto alla determinazione umana delle caratteristiche qualitative dell'aria analizzata, ma pone, sul piano pratico, tutte le difficoltà comuni all'uso di apparecchiature complesse, all'applicazione delle tecniche su campo ed all'interpretazione dei risultati.

La principale difficoltà che si incontra nell'effettuare tali misurazioni è rappresentata dal fatto che la tipologia delle sostanze non è nota a priori e le concentrazioni da rilevare hanno spesso valori così bassi da non consentire l'utilizzo di molte tecniche di uso comune nel campo dell'igiene industriale.

Inoltre la situazione è ulteriormente complicata dalla diversità tipologica degli inquinanti che si presentano come gas, vapori, sostanze particellari, gas radioattivi.

Generalmente le misure prevedono un campionamento sul posto con apparecchiature piccole, silenziose ed economiche, e un'analisi di laboratorio con strumenti più complessi per la separazione e l'identificazione degli inquinanti.

### *1.1. Misure riferite alle persone*

Le misure condotte per mezzo dei campioni umani rivestono un ruolo molto importante nell'ambito di indagini sulla qualità dell'aria indoor: infatti la presenza di contaminanti nel corpo a vari livelli e le reazioni di tipo allergico o i malesseri negli occupanti aiutano ad individuare con sufficiente precisione sia il tasso di inquinamento dovuto a determinate sostanze che il tasso globale di inquinamento dell'ambiente e quindi il livello di qualità dell'aria corrispondente.

Come già anticipato, la valutazione attraverso misure riferite alle persone può essere condotta ricorrendo a quattro tecniche diverse (Bocchio, 1992):

- a) il giudizio di persone addestrate;
- b) la percezione dei visitatori;
- c) l'uso di questionari;
- d) le analisi cliniche.

In particolare, riguardo alle prime due tecniche di misura, è stata definita una metodologia di indagine in grado di fornire valutazioni aventi un certo grado di oggettività e di riproducibilità, basata sul giudizio espresso da una commissione di persone, che possono essere addestrate al riconoscimento ed alla quantificazione degli odori o visitatori occasionali.

La procedura si differenzia in base al tipo di campione umano che si ha a disposizione: tutti i visitatori, comunque, per evitare fenomeni di adattamento, nel formulare il giudizio devono tenere conto delle sensazioni percepite appena entrate nel locale, dopo aver respirato aria di buona qualità, ed all'uscita, entrando nuovamente a contatto con aria fresca.

La prima impressione è infatti la più attendibile, poichè nel giro di 15 minuti si verifica l'adattamento agli odori. Per dare un'idea del fenomeno dell'adattamento si pensi che l'assuefazione ai bioeffluenti umani è molto veloce; quella al fumo è a livelli medi; mentre è difficile abituarsi ai

componenti del fumo irritanti per le mucose e alla maggior parte degli inquinanti prodotti dai materiali edili (EEC, 1992).

### **1. Misure attraverso il giudizio di persone addestrate**

In caso di ricorso alla commissione appositamente addestrata al riconoscimento degli odori il giudizio viene espresso dalle persone confrontando le sensazioni olfattive su di esse provocate dall'aria dell'ambiente in esame con alcune concentrazioni di sostanze di riferimento che vengono riprodotte attraverso l'uso di uno strumento detto *decipolmetro*.

Esso è costituito da un contenitore all'interno del quale sono contenute delle boccette riempite di *2-propanone*, un gas che evapora passivamente: l'operatore, variando il numero di boccette, stabilisce la concentrazione di gas all'interno dello strumento che produce il livello di odore avvertito nell'ambiente.

La relazione analitica fra il livello di inquinamento dell'aria  $C$  espresso dagli operatori in decipol e la concentrazione  $X$  di gas in ppm all'interno dello strumento è la seguente (Bluyssen et al., 1989; Bluyssen e Fanger, 1990):

$$C = 0.84 + 0.22 X_{2\text{-propanone}}$$

A tale campione umano viene attribuita la capacità di fornire valutazioni con un certo livello di oggettività e di riproducibilità, fungendo da vero e proprio strumento di misura.

### **2. Misure attraverso la percezione dei visitatori**

La commissione di persone non preparate preventivamente a formulare un giudizio sull'aria deve essere costituita da un gruppo di persone imparziali, scelte casualmente e prive di rapporti con l'edificio in questione (affinché l'indagine abbia valenza statistica è consigliabile che la commissione sia composta da almeno 20 persone).

Ad ogni componente viene chiesto se, trovandosi esposto a quell'aria durante la sua giornata lavorativa, ne giudicherebbe accettabile la qualità. Questa viene poi espressa per mezzo della percentuale di persone insoddisfatte, cioè della percentuale di persone che, come prima impressione, non appena entrate, abbiano espresso un giudizio negativo sull'aria di quell'ambiente.

La relazione intercorrente tra qualità dell'aria misurata per mezzo della percentuale di visitatori insoddisfatti ed espressa in decipol è mostrata in figura 8 (EEC, 1992): in base a questa curva sono stati definiti i tre livelli di qualità dell'aria percepita in un ambiente interno proposti nelle linee-guida europee (riportati nella tabella 12) ed utilizzati nella progettazione climatica degli edifici.

A sua volta la percentuale di insoddisfatti può essere espressa, come già visto (capitolo I, paragrafo 4.2), in funzione della concentrazione di un inquinante rappresentativo (ad esempio la  $\text{CO}_2$  per il caso dei bioeffluenti umani) o del tasso di ventilazione dell'ambiente stesso (figure 1 e 2).

Anche in queste curve è possibile individuare i valori di concentrazione di  $\text{CO}_2$  e del tasso di ventilazione corrispondenti ai tre livelli di qualità dell'aria A, B, C (figg. 17-18). In particolare, le concentrazioni di  $\text{CO}_2$  (esprese come differenze rispetto ai valori esterni, che tipicamente sono dell'ordine di  $700 \text{ mg/m}^3$ , pari a 350 ppm) corrispondenti ai livelli di qualità relativi alle 3 categorie A, B, C sono rispettivamente pari a 460 ppm, 660 ppm e 1190 ppm.

### **3. Misure attraverso l'uso di questionari**

Come già visto in precedenza, l'uso di questionari per la valutazione della qualità dell'aria ha lo scopo di raccogliere informazioni dagli occupanti un certo edificio riguardanti l'entità del discomfort e le sintomatologie associabili alla sua fruizione, per poi confrontarle con quelle relative a situazioni standard.

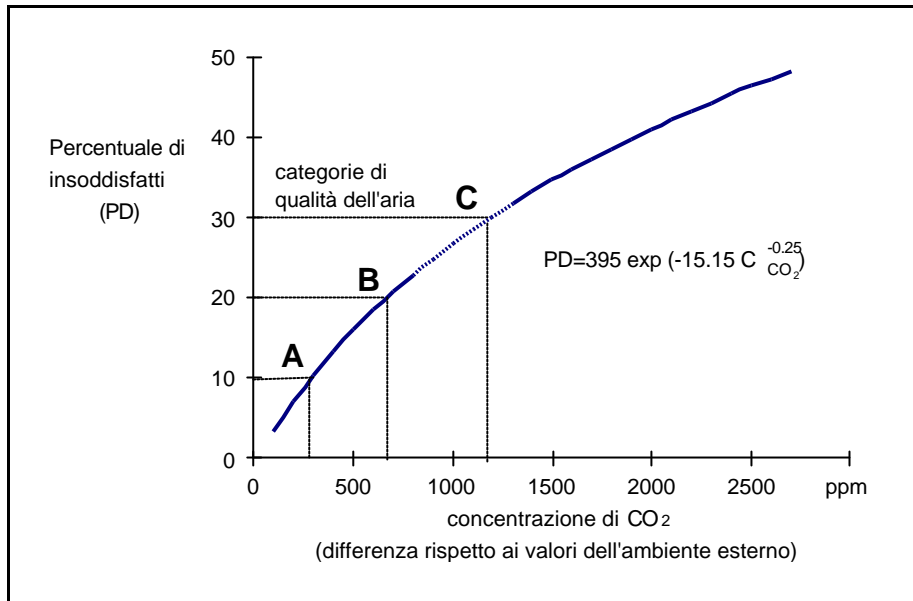


Figura 17 - Percentuale di insoddisfatti in funzione della concentrazione di anidride carbonica in ambienti in cui l'unica fonte di inquinamento è costituita dagli occupanti.

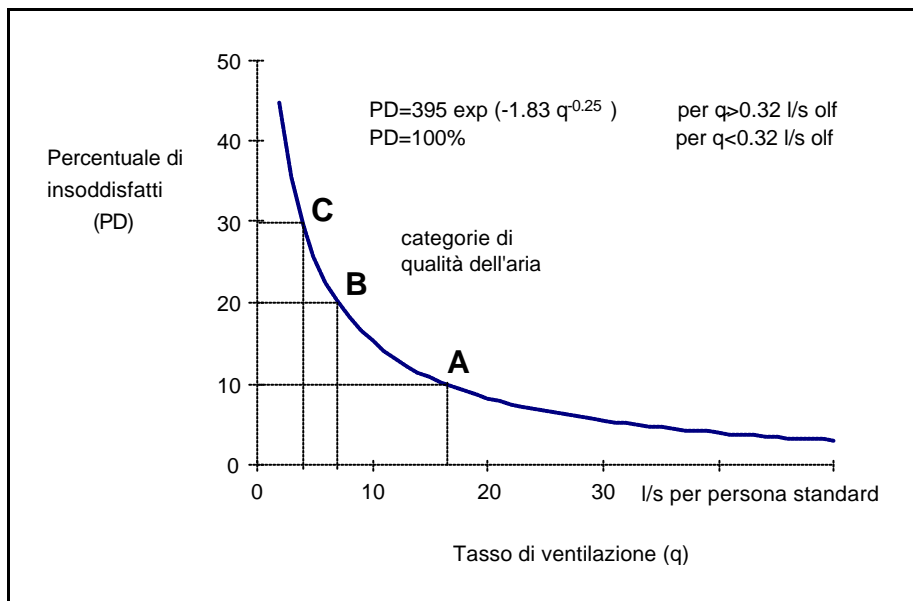


Figura 18 - Percentuale di insoddisfatti in funzione del tasso di ventilazione in un ambiente in cui il tasso di inquinamento è pari ad 1 olf.

Generalmente le schede distribuite contengono domande di tipo diverso, che vanno da quelle sulla qualità dell'aria (sulla presenza di odori, la freschezza dell'aria, etc.) e dell'ambiente in generale

(sulle condizioni termiche, acustiche e di illuminazione) a quelle di tipo psicologico, a quelle, infine, sui sintomi di malessere (irritazioni agli occhi, mal di testa, stanchezza, nausea, etc.), etc..

In base alle informazioni richieste, gli occupanti l'edificio in esame possono essere accorpati in gruppi con riferimento agli ambienti occupati nell'edificio, al tempo di permanenza in esso, ecc..

In generale, dalle risposte fornite si riescono ad ottenere informazioni abbastanza precise sull'esistenza di situazioni a rischio, dovute all'esistenza di sostanze presenti in concentrazioni superiori ai valori limite.

Dopo aver apportato nell'ambiente le misure correttive appropriate in base alle risposte ottenute, è opportuno chiedere alle persone interessate la compilazione di una seconda scheda, da effettuarsi possibilmente nell'arco dello stesso anno, confrontando i risultati ottenuti.

#### **4. Misure attraverso analisi cliniche**

Tale tecnica di misura consiste nel sottoporre gli abitanti di un edificio ad alcuni esami medici sui rispettivi fluidi corporei per determinare se e in quale quantità il loro organismo abbia assorbito le sostanze inquinanti presenti nell'ambiente. Dai risultati di tali analisi è possibile ottenere informazioni esatte sulle sostanze presenti e quindi risalire alle concentrazioni degli stessi inquinanti nell'aria.

In zone caratterizzate da elevata variabilità delle concentrazioni delle diverse sostanze può essere più significativo effettuare questo tipo di test sulle persone che frequentano stabilmente la zona rispetto alla misura delle concentrazioni in aria.

Utilizzando tale metodo non si riesce tuttavia a tenere conto delle sensazioni di malessere e di disagio che provoca il contatto con una cattiva qualità dell'aria.

#### *1.2. Misure riferite all'aria*

Tutte le volte che i sensi umani avvertono sensazioni sgradevoli entrando a contatto con l'aria di un ambiente è importante determinare quantitativamente le possibili variazioni nella sua composizione naturale, individuando le sostanze estranee che l'hanno provocata o i componenti la cui concentrazione è stata alterata. A tal fine il ruolo delle analisi chimiche è fondamentale. Solo tali analisi, inoltre, consentono di individuare alcune sostanze che non risultano percepibili all'olfatto, pur potendo essere potenzialmente molto pericolose.

Infine la misura quantitativa dei vari inquinanti risulta indispensabile per consentire la verifica della rispondenza dei livelli di concentrazioni inquinanti con le condizioni di ammissibilità definite dalla normativa di settore.

Tutti i metodi che si basano su analisi chimiche tuttavia, pur risultando più precisi nella determinazione dei livelli di inquinamento delle diverse sostanze, presentano il limite di non tenere conto delle sensazioni di malessere degli occupanti connesse con una cattiva qualità dell'aria.

Possibili obiettivi delle misure possono essere l'identificazione delle sorgenti inquinanti, la determinazione dei livelli di esposizione della popolazione, la verifica del successo delle eventuali misure di intervento adottate.

Nel condurre una misura e nel valutarne i risultati è molto importante conoscere la *storia* di un ambiente antecedente e successiva alla misura.

I livelli di inquinamento di un ambiente, infatti, sono estremamente variabili, dipendendo dallo spazio, dal tempo, dal tipo di sorgente inquinante e di ambiente ma anche da altri fattori caratterizzati da una certa variabilità come il tasso di ventilazione, le condizioni microclimatiche e le attività svolte dagli occupanti. Anche l'età dell'edificio contribuisce a tale variazione.

Per l'insieme di tali ragioni risulta quindi di estrema importanza che tale storia di un ambiente venga documentata, soprattutto nel caso in cui vengono eseguite misure a breve termine.



Le concentrazioni di inquinanti indoor (e le loro variazioni nel tempo) possono infine essere influenzate anche dal livello di inquinamento esterno, a sua volta variabile nel tempo: pertanto, se si ritiene che l'aria esterna possa contenere significative quantità di inquinanti, è necessario analizzarne la qualità per non attribuire elevati livelli di concentrazioni inquinanti a sorgenti indoor quando i processi di infiltrazione dall'esterno ne sono la causa principale.

Nella misura del livello di inquinamento indoor, infine, particolare rilevanza può avere la determinazione dei livelli di picco che possono realizzarsi nell'ambiente indagato.

Tali situazioni possono essere simulate intervenendo sui tassi di ventilazione o sui parametri che fanno aumentare il tasso di emissione: ad esempio, poichè le emissioni di formaldeide aumentano all'aumentare della temperatura e dell'umidità relativa, per riprodurre le condizioni massime di concentrazione che si possono verificare in un dato ambiente si possono elevare tali parametri entro limiti reali.

## **2. Strumentazione tecnica per misure riferite all'aria**

L'esigenza di pervenire, oltre che all'esatta individuazione delle sostanze inquinanti presenti in un ambiente, anche alla determinazione quantitativa della loro dimensione, forma e peso molecolare ha dato impulso, negli ultimi venti anni, all'impiego di una grande varietà di tecniche sperimentali, quali lo *scattering di luce*, la *microscopia ottica ed elettronica*, la *sedimentazione*, la *centrifugazione*, la *filtrazione*, la *diffusione*, ecc.

Di conseguenza il mercato offre, al giorno d'oggi, una vasta gamma di apparecchiature utilizzabili per la misura di sostanze inquinanti indoor.

In generale, la strumentazione da prescegliere dipende dal tipo di gas da analizzare e dalle finalità della misurazione da condurre. Inoltre, per la misura di un singolo agente contaminante può essere impiegato più di uno strumento o metodo di misura.

Attualmente le apparecchiature disponibili, utilizzabili singolarmente o in combinazione, possono essere così raggruppate:

- a) *provette rivelatrici;*
- b) *provette campionatrici;*
- c) *gas-cromatografi;*
- d) *spettrometri;*
- e) *sensori di gas e di miscele di gas;*
- f) *rivelatori nucleari a traccia.*

A tale strumentazione va inoltre aggiunta un tipo di apparecchiatura sviluppata recentemente per misure di emissione chimica dei materiali.

Le provette rivelatrici, con indicazione colorimetrica a lettura diretta, sono gli strumenti di misura più semplici per l'analisi dei gas e possono misurare approssimativamente ben 350 sostanze differenti. Il loro limite è però la bassa selettività; inoltre ogni provetta può essere utilizzata solo una volta.

Per l'analisi di miscele complesse la misura dovrà inoltre essere integrata da un'analisi in laboratorio: in questo caso l'aria contaminata viene raccolta da una provetta campionatrice

adsorbente e poi analizzata in laboratorio con metodi gas-cromatografici o con tecniche combinate di cromatografia e spettroscopia.

La flessibilità del metodo con provette campionatrici si presta bene alle diverse applicazioni per misurazioni di inquinanti sul posto di lavoro ed anche in edifici residenziali.

I gas-cromatografi realizzano, per mezzo dell'adsorbimento di sostanze gassose da parte di liquidi o solidi, la separazione delle diverse sostanze componenti una miscela, consentendo di effettuare su di esse analisi qualitative e quantitative.

Gli spettrometri consentono di effettuare determinazioni qualitative e quantitative sulle sostanze a partire dall'esame dei loro spettri di emissione o di assorbimento. Sono strumenti molto versatili, ad elevata selettività, ma molto costosi e con elevati costi di manutenzione; essi richiedono inoltre la presenza di tecnici specializzati per effettuare le calibrazioni e la corretta interpretazione delle letture.

I sensori di gas e di miscele di gas effettuano rilevazioni basandosi su fenomeni elettrochimici; in particolare i sensori di miscele di gas analizzano le miscele nel loro complesso e non permettono quindi di misurare le concentrazioni dei diversi gas selettivamente.

I rivelatori nucleari a traccia, infine, sono utilizzati per la misurazione del radon e delle particelle radioattive.

Nel seguito verranno descritti brevemente i diversi strumenti elencati, illustrandone vantaggi e limiti ed accennando, per quelli più complessi, alle tecniche di misura su cui sono basati.

#### *Provette rivelatrici*

Il primo prototipo di provetta fu brevettato in America nel 1919 da Lamb e Hoover ed era costituito da una fiala contenente pomice impregnata di una miscela di pentossido di iodio ed acido solforico. Tale strumento fu il primo sensore chimico utilizzato per la rilevazione della presenza di monossido di carbonio (all'epoca lo strumento era utilizzabile solo per determinazioni qualitative).

Oggi esistono in commercio più di 200 tipi di provette, che possono misurare più di 350 gas e vapori differenti.

Il loro principale campo di utilizzazione è la misura dei contaminanti aerei nei posti di lavoro, se presenti in concentrazioni contenute nel campo dei limiti di esposizione occupazionali.

Il sistema di misura è composto da una provetta rivelatrice (che contiene un sistema chimico reagente molto sensibile) e da una pompa, che costituiscono in pratica una singola unità campionante.

La pompa manda un campione di aria nella provetta, innescando al suo interno una reazione chimica. Il preparato chimico reagisce con la sostanza da misurare cambiando colore: dalla durata della colorazione si risale alla concentrazione della sostanza misurata, essendo il tempo proporzionale alla massa reagente.

La scala graduata riportata sulla provetta consente di convertire le unità di massa in ppm o per cento in volume. Le letture fornite sono molto precise e non è necessaria alcuna calibrazione da parte dell'operatore.

Si distinguono provette *a breve* e *a lungo termine*.

Le provette a breve termine sono particolarmente indicate per misure sul posto da effettuarsi per periodi di tempo relativamente brevi (dai 10 secondi ai 15 minuti). Esse risultano particolarmente adatte per valutare fluttuazioni di concentrazione, effettuare misure di contaminanti in zone con presenza di lavoratori o indagini all'interno di spazi confinati (quali, ad esempio, serbatoi chimici, fognature, ecc.).

Provette a breve termine vengono inoltre utilizzate come strumenti segnalatori di rischi di esplosioni.

Negli ambienti indoor, infatti, oltre a rilevare l'eventuale presenza di prodotti inquinanti nocivi alla salute, è importante anche verificare le concentrazioni raggiunte da sostanze capaci di provocare gravi incidenti, come incendi o esplosioni in zone a rischio (quali possono essere le abitazioni in vicinanza di discariche); inoltre, per poter stabilire l'esistenza di eventuali pericoli di esplosione, occorre determinare il contenuto di ossigeno nell'ambiente.

Per realizzare queste misurazioni si può utilizzare uno strumento costituito da un insieme di cinque provette rivelatrici calibrate che effettuano le misure simultaneamente, consentendo una significativa riduzione del tempo di misura, chiamato *Insieme di Test Simultanei*.

Esso può essere anche utilizzato per misurare i gas di combustione e di decomposizione: in ogni incendio si sviluppano infatti gas provenienti dalla decomposizione e dalla combustione delle sostanze coinvolte. Studi recenti hanno dimostrato che in un incendio vengono prodotte più di 450 sostanze diverse, non tutte sempre presenti: di queste, solo 11 gas inorganici sono comunemente presenti.

Oltre alla capacità di fornire misure nell'area dell'incendio, tali strumenti sono anche molto utili per rilevare la diffusione dei gas di combustione e decomposizione verso altre zone: tali gas presentano infatti un sostanziale pericolo di tossicità non solo per le persone stazionanti nelle immediate vicinanze, ma anche per quelle che si trovano nelle zone adiacenti.

Ulteriori utilizzazioni delle provette a breve termine sono:

- la determinazione del monossido di carbonio presente nell'aria espirata;
- la determinazione di contaminanti volatili in acqua;
- l'analisi del gas del sottosuolo.

Le provette a lungo termine servono invece per rilevamenti di concentrazioni medie (e quindi medie pesate nel tempo) e sono utilizzate per periodi di durata da una a otto ore.

Per misure a lungo termine possono anche essere utilizzate *provette a diffusione* a lettura diretta, anch'esse adatte alla determinazione di concentrazioni medie nel tempo.

A differenza delle provette a lungo termine vere e proprie, esse realizzano un sistema di misura passivo, basato sulla diffusione molecolare di contaminanti nell'aria, e non richiedono l'uso della pompa: infatti le molecole di contaminante entrano nella provetta seguendo i principi delle leggi di diffusione, cioè si muovono spontaneamente da una zona a concentrazione più elevata (l'aria ambiente) ad una a concentrazione più bassa (l'interno della provetta).

La scala stampata su una provetta a diffusione rappresenta il prodotto della concentrazione per il tempo di esposizione ed è espressa in ppmh. Per determinare la concentrazione media di un contaminante, la lettura viene divisa per il tempo di esposizione (ad esempio il tempo di campionamento), espresso in ore:

$$c = \frac{\text{indicazione in ppmh}}{\text{tempo in h}} \quad (\text{ppm}).$$

*Provette campionatrici*

In tutti quei casi in cui le provette rivelatrici non sono in grado di distinguere i vari gas presenti nell'aria è necessario analizzare il campione in laboratorio, utilizzando vari metodi come la gas cromatografia, la cromatografia liquida ad alta prestazione, la fotometria o la spettroscopia.

Quest'operazione è necessaria quando sono presenti sostanze complesse o chimicamente molto simili (come ad esempio miscele di metanolo, etanolo e propanolo), nel qual caso un sistema di reazione colorimetrica basata su un indicatore cromatico non riesce a distinguere tra le diverse sostanze ed indica solamente la somma delle concentrazioni.

In tali casi vengono utilizzate provette campionatrici, che hanno il solo compito di raccogliere il campione d'aria. Esse vengono anche chiamate indicatori indiretti perché non cambiano colore, non innesandosi al loro interno nessuna reazione chimica, a differenza delle provette rivelatrici.

Il campionamento realizzato in una provetta campionatrice è detto *attivo* poiché prevede che l'aria da esaminare venga aspirata al suo interno tramite una pompa (figura 19).

*Figura 19 - Provetta per il campionamento attivo.*

Quando si effettuano monitoraggi sul personale l'apparecchio va attaccato al vestito della persona, il più vicino possibile al punto di inalazione.

Il volume d'aria da immettere nella provetta è funzione della sostanza da misurare e della concentrazione attesa ed in genere è compreso tra 1 e 20 litri. Dalle successive analisi di laboratorio se ne valuta la massa, rendendo così possibile la determinazione della concentrazione del contaminante nell'aria, essendo  $C_1 = m_1/V$ .

Il sistema di campionatura prevede un mezzo di campionamento ad adsorbimento o chemi-adsorbimento. Generalmente le provette contengono carbone di gusci di noci di cocco, differenti tipi di gelo di silice o setacci molecolari.

Lo strato di adsorbimento è costituito da due parti: uno strato primario ed uno secondario, sui quali si accumula la sostanza da campionare.

I due strati vengono analizzati separatamente in laboratorio. L'analisi separata è utile per determinare se l'intera quantità di sostanza misurata è stata assorbita: infatti, alcune volte la capacità di adsorbimento dello strato primario non è sufficiente e si verifica penetrazione, dovuta ad un adsorbimento addizionale, nello strato secondario. Quando ciò accade è necessario utilizzare un nuovo campione, poiché non si ha neanche la sicurezza che l'intera quantità di sostanza sia stata assorbita dai due strati.

Alcuni campionatori attivi ad elevata sensibilità (2 ppb-ora) hanno il vantaggio di determinare simultaneamente la formaldeide, le aldeidi ed i chetoni e possono essere utilizzati sia per le misura in ambiente che per quelle di esposizione delle persone.

In particolare per quanto riguarda le aldeidi, il substrato che permette di campionarle è costituito da un filtro di cellulosa o fibra di vetro, impregnato di una sostanza particolare che con esso reagisce formando composti. Questi vengono quindi eluiti dal filtro in laboratorio ed analizzati con tecniche cromatografiche (vedi paragrafo successivo) che consentono di separare la miscela nei suoi componenti, permettendo l'identificazione e quantificazione delle aldeidi con sensibilità analitica molto elevata. (Nel caso della formaldeide, ad esempio, è possibile rilevare concentrazioni in aria dell'ordine di 1 mg/m<sup>3</sup>).

Particolari tipi di campionatori sono inoltre quelli detti *a diffusione*, che differiscono dai campionatori attivi sostanzialmente per il modo in cui si raccoglie il campione d'aria: le molecole di contaminante vengono trasportate all'interno per diffusione (e non per mezzo di una pompa), dove raggiungono lo strato di adsorbimento (figura 20).

Essi sono stati studiati per campionamenti di lungo periodo, generalmente da una ad otto ore.

Il metodo di campionatura utilizzato con tale tipo di campionatori è detto *passivo* poiché, come già visto per le provette a diffusione, si basa sulla proprietà che possiedono tutte le sostanze disperse in un mezzo diluente di diffondere da zone a concentrazione più elevata verso zone a concentrazione più bassa, fino a raggiungere valori uniformi in tutto il mezzo. In particolare tali campionatori sfruttano la capacità che hanno alcuni materiali adsorbenti di trattenere le molecole che raggiungono la loro superficie, mantenendo costante il gradiente di concentrazione tra l'aria ambiente e la loro superficie.

La massa di sostanza adsorbita può essere calcolata usando la prima legge della diffusione di Fick:

$$\Delta c_i = \frac{m_i L}{D_i t A} \quad (\text{mg/m}^3) \quad (6.1),$$

in cui  $\Delta c_i$  è la differenza di concentrazione tra gli estremi del percorso di diffusione  $L$  (praticamente  $\Delta c_i$  è equivalente alla concentrazione di sostanza nell'ambiente),  $m_i$  la massa di sostanza che nel tempo  $t$  diffonde attraverso la sezione di area  $A$  del campionatore, normalmente al gradiente di concentrazione, e  $D_i$  il coefficiente di diffusione specifico della sostanza.

I campionatori a diffusione sono solitamente utilizzati per la misura del materiale particellare. L'aria è campionata a 3.25 l/min e le particelle sono separate per filtrazione, quindi selezionate e pesate con bilance di precisione.

Per il campionamento dei VOC attualmente la tendenza degli igienisti industriali è quella di utilizzare sistemi a diffusione che impiegano adsorbenti costituiti da carboni attivi modificati o da resine polimeriche di provenienza gascromatografica, quali il *Tenax* ed il *Chromosorb*. Da questi substrati, gli analiti captati vengono recuperati con la tecnica del desorbimento termico.

Il recupero per eluizione con solventi, molto diffuso in igiene industriale, non è utilizzabile nell'inquinamento indoor per i bassi valori di concentrazione reperiti in questi ambienti. L'analisi è poi eseguita con la gascromatografia capillare ad alta risoluzione, abbinata alla spettrometria di massa.

*Figura 20 - Schema di funzionamento del campionatore a diffusione.*

### *Gas-cromatografi*

Il principio di funzionamento di questi strumenti si basa sull'applicazione di una tecnica nota come cromatografia, che consiste in un procedimento chimico che consente la separazione e la purificazione di sostanze organiche ed inorganiche a partire dalle loro miscele, sfruttando la diversa velocità di migrazione dei vari componenti.

La gas-cromatografia, in particolare, è una tecnica cromatografica basata sull'adsorbimento di sostanze gassose da parte di solidi o liquidi supportati e sull'osservazione della diversa velocità di eluizione dei componenti la miscela adsorbita da parte del cosiddetto gas di trasporto.

L'analisi cromatografica si articola nelle fasi seguenti: il campione da esaminare viene introdotto in un'apposita camera dove, se liquido, viene vaporizzato e quindi, mediante un gas di trasporto (che più frequentemente è idrogeno o elio, ma può essere anche azoto, anidride carbonica o argon) viene fatto passare attraverso una colonna termostatica di forma e lunghezza opportune,

riempita di grani di inerte impregnato del liquido o del solido che deve effettuare l'adsorbimento delle sostanze gassose.

Il liquido che impregna i grani di inerte della colonna è chimicamente affine alla sostanza da esaminare in modo tale da non scatenare reazioni irreversibili.

La colonna in genere è costituita esternamente di rame, ottone, acciaio inossidabile, vetro o materiale plastico, ha diametro da 1 mm a 6 mm ed è di lunghezza elevata: per tale ragione le si dà una forma a serpentino o ad U. Nei moderni apparecchi è possibile mantenerla ad una temperatura variabile da  $-20^{\circ}\text{C}$  a  $+500^{\circ}\text{C}$  ed è quindi possibile analizzare sostanze con punto di ebollizione compreso in questo intervallo, purché esse non si alterino quando vengono vaporizzate.

Al suo interno viene effettuata la separazione delle sostanze componenti la miscela da analizzare, che separatamente arrivano al rivelatore e vengono registrate.

La registrazione mostra, per ciascuna sostanza, picchi caratteristici relativi alle particolari condizioni sperimentali e cioè alla temperatura, alla natura e lunghezza della colonna, alla natura e pressione del gas di trasporto.

Un esempio di cromatogramma è riportato in figura 21.

*Figura 21 - Esempio di cromatogramma.*

Da tali diagrammi è possibile ottenere informazioni qualitative e quantitative sui vari componenti: in particolare le distanze tra i picchi delle varie sostanze rappresentano il tempo necessario perché una sostanza venga separata dalle altre e quindi rilevata e registrata sullo strumento (*tempo di ritenzione*) ed essendo tale intervallo di tempo specifico di ciascuna sostanza, essa può essere in tal modo individuata.

L'analisi quantitativa si esegue invece misurando l'area sottesa dai picchi, che è proporzionale alle quantità di sostanza separata.

I rivelatori che captano le sostanze separate dalla miscela originaria e le registrano sono dei *rivelatori a ionizzazione di fiamma o a conducibilità termica*.

I primi ionizzano le varie sostanze separate nella colonna e, sotto forma ionica, le fanno scaricare su un elettrodo: la corrente che così si origina viene registrata e permette di risalire alla quantità e qualità delle sostanze.

I rivelatori a conducibilità termica si basano invece sulla differente conducibilità termica che ha il gas di trasporto quando in esso è contenuta anche una sostanza eluita. Questa variazione di conducibilità provoca la variazione di resistenza di un filamento di cui si registra la corrente di sbilanciamento, tramite la quale si risale quindi alla sostanza eluita.

Per la misurazione dei composti organici in fase gassosa vengono generalmente utilizzati gascromatografi portatili ed analizzatori portatili a lettura diretta. In essi tutti i solventi, gas e vapori vengono rilevati mediante un elemento a fotoionizzazione, con sensibilità compresa tra 0.1 e 2000 ppm.

Ancora oggi, invece, esistono problemi per la individuazione dei composti più volatili (cloruro di vinile e cloruro di metilene) e per i composti polari (ossido di etilene e acrilonitrile).

Per la nicotina viene utilizzata la tecnica della gascromatografia e del rilevamento ad idrogeno selettivo, mentre per i composti organici volatili di solito si utilizza la gascromatografia con il rilevamento a spettrometria di massa (vedi paragrafo successivo).

Infine si vuole segnalare un metodo sviluppato di recente in laboratorio (Kirchner et al., 1994), che riguarda un apparecchio di misura composto da un desorbitore termico accoppiato con un cromatografo in fase gassosa, un sensore a ionizzazione di fiamma ed uno spettrometro di massa. Tale sistema potrebbe permettere una valutazione della relazione ipotizzata tra i composti organici volatili, l'intensità di odore e la sensazione olfattiva: infatti, anche se con dovute cautele e limitazioni, è stato introdotto il concetto dell'utilizzo dei composti organici volatili totali (TVOC), indicatori della risposta soggettiva alle esposizioni di VOC negli ambienti interni, come misura complessiva della qualità dell'aria interna (Møhlave e Nielsen, 1992).

### *Spettrometri*

Sono in generale basati su tecniche spettroscopiche. Con tale dizione si comprende una grande varietà di tecniche, quali lo *scattering di luce e di neutroni*, la *diffrazione dei raggi X*, *tecniche ad ultrasuoni*, ecc., che costituiscono degli strumenti molto potenti per l'identificazione e la caratterizzazione chimico-fisica delle sostanze inquinanti.

Tali tecniche consentono, oltre all'esatta individuazione delle sostanze inquinanti presenti in un ambiente (loro composizione chimica, temperatura e stato fisico), anche la determinazione quantitativa delle loro dimensioni, forma e peso molecolare.

In generale tali informazioni si ottengono dall'analisi degli spettri delle radiazioni elettromagnetiche emesse o assorbite dalle sostanze; utilizzando invece tecniche basate su fenomeni acustici, si analizzano le emissioni di suoni da parte di un gas che assorba radiazioni.

Lo spettro della luce emessa o assorbita da un corpo (che è il risultato della scomposizione di un raggio luminoso nei singoli colori componenti) può essere ottenuto per dispersione attraverso un prisma o per diffrazione attraverso un reticolo, utilizzando uno strumento detto spettroscopio che separa le diverse componenti spettrali (cioè le onde elettromagnetiche) in funzione della loro lunghezza d'onda. Questa separazione può essere effettuata nello spazio, concentrando le diverse componenti in posizioni diverse, o nel tempo, concentrandole in istanti successivi.



Gli spettri possono essere di emissione e di assorbimento: in particolare i primi consentono di individuare gli elementi presenti nella sostanza emettitrice, i secondi gli elementi presenti nei gas attraversati.

Attualmente le tecniche spettroscopiche permettono di individuare sia righe spettrali con frequenza di qualche centinaio di Hertz (associate all'orientazione dei nuclei atomici nel campo magnetico terrestre) che righe con frequenza di circa  $10^{22}$  Hz (associate all'emissione di raggi  $\gamma$  da parte dei nuclei). In qualsiasi regione compresa tra questi due estremi di frequenza è possibile misurare un numero molto elevato di righe, associate alla struttura di nuclei, atomi, molecole e cristalli. I metodi per produrre o registrare spettri in un intervallo di frequenza così ampio ovviamente variano moltissimo.

Se, in particolare, per una determinata sostanza interessa anche effettuare misure di energia luminosa assorbita contemporaneamente su tutte le frequenze dello spettro si può far ricorso ad uno *spettrofotometro*.

Nell'ambito degli strumenti che utilizzano tecniche spettroscopiche, gli analizzatori *ad assorbimento nell'infrarosso* basano il loro principio di funzionamento sul confronto fra l'assorbimento nel campo delle radiazioni infrarosse del gas la cui composizione si vuole misurare e di un gas di riferimento. Il tempo di risposta dello strumento è dell'ordine di pochi secondi.

Il principale svantaggio di questi strumenti è rappresentato dalla limitata estensione del campo dinamico; è inoltre necessario disporre di tante celle di misura con i relativi gas campione, quanti sono i gas da misurare.

Soprattutto per la rilevazione di monossido di carbonio ed ozono, anche se esistono metodi che utilizzano sensori elettrochimici, la spettroscopia all'infrarosso è solitamente la scelta più comune, per i tempi di risposta rapidi e l'elevata immunità agli agenti interferenti; inoltre tale tecnica non necessita di materiali di consumo, con evidente riduzione dei costi di manutenzione e sorveglianza.

Altri tipi di spettrometri sono i cosiddetti *spettrometri di massa*, che sono molto precisi e consentono la rilevazione di valori di concentrazione molto bassi: essi sono tuttavia molto delicati, costosi e laboriosi da tarare.

Infine, recentemente sono comparsi sul mercato analizzatori di gas di tipo *fotoacustico*, aventi sensibilità elevate, il cui principio di funzionamento è basato sul cosiddetto "effetto fotoacustico", che corrisponde all'emissione di un suono prodotto da un campione di gas che assorba radiazioni provenienti da una sorgente intermittente di luce (ad esempio una sorgente pulsante).

La sorgente di luce più adatta è quella che emette radiazioni con frequenza nella regione degli infrarossi; in genere viene utilizzata una sorgente ad incandescenza.

Quando il gas viene irraggiato da una sorgente luminosa, assorbe una parte dell'energia luminosa proporzionalmente alla sua concentrazione ed alla lunghezza d'onda della radiazione. L'energia luminosa assorbita si trasforma quindi in calore provocando un aumento di pressione: se, in particolare, la luce incidente viene modulata ad una certa frequenza, la radiazione verrà assorbita selettivamente e l'aumento di pressione sarà periodico, con frequenza pari a quella di modulazione. Pertanto alternativamente il gas si raffredda e si riscalda e tali fluttuazioni di temperatura generano onde di pressione, che emettono suoni misurabili con un microfono.

Utilizzando metodi tradizionali di spettroscopia, che consentono di determinare l'energia assorbita dal gas tramite la misura della quantità di luce trasmessa, per basse concentrazioni del gas attraversato si manifestano evidenti limiti di sensibilità, poichè la luce viene quasi completamente

trasmessa; nella spettroscopia fotoacustica invece il problema è superato poichè in assenza di gas nella camera non viene emesso alcun segnale.

Questo tipo di analizzatore di gas presenta il grosso vantaggio di poter monitorare simultaneamente fino a 6 gas diversi. La gamma di misura ottenibile va da 0.2 ppm a 10 ppm, con un limite minimo di rilevazione prossimo ad 1 ppb e riproducibilità dell'1%.

Cambiando i filtri ottici variano le sensibilità e possono essere selezionate diverse sostanze, tra le quali: anidride carbonica, ossido di carbonio, ozono, metano, formaldeide, cloruro di metilene, acetone, butanone, biossido di zolfo, benzene, metacrilato di metile, fenolo, etanolo, butano, cloruro di etile, ammoniacca (ad esempio per i VOC le sensibilità variano da 0.01 ppm a 0.12 ppm, per la formaldeide da 0.1 a 500 ppm e per l'ozono raggiungono addirittura 1 ppb).

I principali svantaggi di questi strumenti sono i costi elevati ed i tempi di risposta piuttosto lunghi (da 30 secondi a circa due minuti, a seconda del numero di gas da analizzare).

Le analisi spettrofotometriche oppure icono-cromatografiche sono anche impiegate per la misura dell'esposizione all'NO<sub>2</sub>, quando vengono utilizzati degli strumenti passivi come il *cilindro di Palmes* ed il *segnalatore di Yanagisawa* (De Santoli et al., 1995).

Il primo è un tubo acrilico o metallico di circa 1 cm di diametro e 7 cm di lunghezza, contenente tre griglie di acciaio inossidabile rivestite di una particolare sostanza detta trietonolamina. Il fondo del tubo è aperto e permette la diffusione del gas verso l'alto dove, reagendo con la trietonolamina forma un composto stabile. Il secondo impiega una lastra assorbente formata da fibre di cellulosa protette con trietonolamina. In questi casi la sensibilità è dell'ordine di 100 ppb-ora ed i tempi di campionatura vanno da 8 ore a 2 giorni.

Per l'analisi delle particelle invece di solito si utilizza uno spettrometro a raggi X ad integrazione di un microscopio elettronico a scansione, che consente di stabilire non solo la grandezza, il numero e la forma delle particelle, ma anche gli elementi che ne fanno parte (pollini, batteri, fibre, ecc.). Per la raccolta vengono utilizzati sistemi che favoriscono la deposizione delle particelle sulle membrane, utilizzando pompe a vuoto o particolari versioni di ionizzatori.

#### *Sensori di gas e di miscele di gas*

Quando interessa analizzare una miscela nel suo complesso, senza misurare selettivamente la concentrazione dei diversi gas in essa contenuti, si può ricorrere all'uso di sensori di miscele di gas.

Il primo sensore di questo tipo che è stato sviluppato consiste in un semiconduttore sinterizzato di biossido di stagno riscaldato internamente, fatto funzionare come convertitore catalitico in una reazione reversibile basata sul principio di ossido-riduzione (Ihokura, 1986). I gas ed i vapori sono ossidati in modo da ridurre il biossido di stagno. Gli elettroni liberati dal processo redox aumentano la conduttività elettrica del semiconduttore, che può essere rilevata tramite una misura amperometrica.

Questo tipo di sensore risulta comunque influenzato anche dal vapore presente nell'ambiente e mostra una sensibilità non molto elevata (100 ppm).

Un'altra categoria di sensori a gas cumulati è attualmente in fase di studio (De Santoli et al., 1995), e si basa su lunghe e complesse ricerche sperimentali condotte in laboratorio (Scarano e Calcagno, 1975; Scarano et al., 1983; 1993).

Il sensore è del tipo elettrochimico a flusso, ed il principio di funzionamento prevede la diffusione dell'aria da esaminare alla portata di 10-50 ml/s su una membrana plastica, dove viene inviata una soluzione elettrolitica per produrre fenomeni di ossidazione.

Sono attualmente in corso prove per misurare la risposta dello strumento a determinate sostanze indicate in letteratura come materiale di riferimento per l'intensità di sensazione olfattiva (butanolo, acetone) e prove per stabilire l'effettiva operatività in campo e il confronto con i sensori a CO<sub>2</sub>.

Per la misura dell'ossido di carbonio esistono invece strumenti portatili che sfruttano le tecniche della rilevazione elettrochimica, utilizzando un elettrolita liquido o solido nel quale l'ossido di carbonio si converte in anidride carbonica, emettendo un segnale elettrico. E' possibile operare per 40 ore con sensibilità sino a 2 ppm.

Nell'ambito della strumentazione elettrochimica vanno citati infine anche alcuni apparecchi segnalatori di rischi di esplosione che misurano, per mezzo di sensori catalitici, i livelli di concentrazione di combustibili gassosi e vapori a potenziale rischio di esplosione: essi non sono tuttavia progettati per misurare concentrazioni di gas molto basse e non risultano quindi indicati per l'inquinamento indoor.

#### *Rivelatori nucleari a traccia*

I rilevatori nucleari a traccia sono utilizzati nell'analisi dell'aria indoor per la misurazione del radon o altre particelle radioattive.

Essi impiegano una tecnica di misura che si basa sulla rilevazione delle tracce lasciate dalle particelle *alfa* emesse da tali sostanze su un sottile foglio di plastica (policarbonato, nitrato di cellulosa). Dopo un opportuno trattamento chimico che le ingrandisce e le rende visibili, è possibile risalire dalla loro densità al livello medio di radioattività.

#### *Metodi e strumenti utilizzati per misure di emissione chimica dei materiali*

Le emissioni chimiche dei materiali edili sono studiate in camere climatiche delle stesse dimensioni delle stanze reali in cui i materiali emettono.

E' necessario condurre la misura in condizioni di equilibrio perchè il fattore di emissione del materiale si mantenga costante. (Esso di solito viene espresso in µg di sostanza emessa per m<sup>2</sup> di area di superficie del materiale e per secondo). Generalmente dopo aver immesso il campione nella camera climatica passano alcuni giorni prima che l'emissione di sostanze chimiche si sia stabilizzata.

Recentemente per le misure di emissione dei materiali è stata realizzata una particolare apparecchiatura di acciaio inossidabile, detta FLEC (*Field and Laboratory Emission Cell*), che può essere applicata direttamente sulla superficie di un materiale, facilitando così anche l'identificazione delle sorgenti di emissione. Standard industriali basati sulla FLEC sono adottati dai costruttori di materiali edili (Gustafsson, 1992).

## BIBLIOGRAFIA

Alberti M., Berrini M., Dovera D., Melone A., Zambrini M., 1994, *Strumenti per la valutazione di impatto ambientale degli edifici*, CNR, Progetto Finalizzato Edilizia, Ed. BEMA.

Alfano G., d'Ambrosio F.R., de Rossi F., 1987, *Fondamenti di benessere termoigrometrico*, CUEN, Napoli.

ASHRAE 62-1989, *Ventilation for acceptable indoor air quality*, American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers, Atlanta, USA, 1989.

Azione concertata europea, *Qualità dell'aria interna e suo impatto sull'uomo*, Rapporto n. 11, CDA, n. 1, gennaio 1994, pp. 41-61.

Bluyssen P.M., Fanger P.O., 1990, *Addition of olf from different pollutions sources*, Proceedings of the 5th International Conference on Indoor Air Quality and Climate "Indoor Air '90", Toronto, Canada, 29 July - 3 August 1990.

Bluyssen P.M., Kondo H., Pejtersen J., Gunnarsen L., Clausen G., Fanger P.O., 1989, *A trained panel to evaluate perceived air quality*, Atti di Clima 2000, Sarajevo, vol. 3, pp. 92-97.

Bocchio V., 1992, *Misure di IAQ come classificazione degli ambienti chiusi*, CDA, n. 35, maggio 1992, pp. 737-742.

BREEZE 5.1, 1991, *User manual*, Building Research Establishment, Garston, Watford, WD27JR.

Cain W.S., Leaderer B.P., Isseroff R., Berglund L.G., Huey R.J., Lipsitt E.D. and Perlman D., 1983, *Ventilation requirements in buildings: control of occupancy odor and tobacco smoke odor*, Atmosphere Environment, 17 (6).

Cazzaniga s.p.a., 1994, *La qualità degli impianti di climatizzazione ad aria primaria*, informazioni commerciali.

Chandra S., Fairey P.W., Spain, R.S., 1982, *A handbook for designing naturally ventilated buildings*, Draft report, FSEC-CR-82, 1982.

Cometto-Muñiz J. E. and Hernandez A., 1990, *Odororous and pungent attributes of mixed and unmixed odorants*, Perception and Psychophysics, 47 (4), pp. 291-399.

COOLit-V, *A method for designing natural ventilated buildings*, Pascool Research Project, Design Guidelines Subgroup, Department of Applied Physics, University of Athens, First Draft.

Costanzo S., Pietrafesa M. e Rizzo G., 1994, *Requisiti di qualità per l'aria interna degli edifici: utilizzo delle linee-guida europee per la valutazione del tasso di ventilazione*, 49° Congresso Nazionale ATI, Perugia, 26-30 settembre 1994.

DIN 1946, 1992, *Ventilation and Air-conditioning: Technical health requirements* (in german), Berlin, Germany: Deutsches Institut für Normung.

EEC, 1988, *Radon in Indoor Air*, European Concerted Action: Indoor Air Quality and its impact on man (COST Project 613), Report n. 1, Commission of the European Communities, Luxembourg.

EEC, 1989a, *Sick Building Syndrome - A Practical Guide*, European Concerted Action: Indoor Air Quality and its impact on man (COST Project 613), Report n. 4, Commission of the European Communities, Luxembourg.

EEC, 1989b, *Indoor Pollution by NO<sub>2</sub> in European Countries*, European Concerted Action: Indoor Air Quality and its impact on man (COST Project 613), Report n. 3, Commission of the European Communities, Luxembourg.

EEC, 1990, *Indoor Air Pollution by Formaldehyde in European Countries*, European Concerted Action: Indoor Air Quality and its impact on man (COST Project 613), Report n. 7, Commission of the European Communities, Luxembourg.

EEC, 1991, *Effects of Indoor Air Pollution on Human Health*, European Concerted Action: Indoor Air Quality and its impact on man (COST Project 613), Report n. 10, Commission of the European Communities, Luxembourg.

EEC, 1992, *Guidelines for Ventilation Requirements in Buildings*, European Concerted Action: Indoor Air Quality and its impact on man (COST Project 613), Report n. 11, Commission of the European Communities, Luxembourg.

Fanger P.O., 1988, *Introduction of the olf and the decipol units to quantify air pollution perceived by humans indoors and outdoors*, Energy and Buildings, n. 12, pp. 1-6.

Fanger P.O., Lauridsen J., Bluyssen P. and Clausen G., 1988, *Air pollution sources in offices and assembly halls, quantified by the olf unit*, Energy and Buildings, n. 12, pp. 7-19.

Fanger P.O. and Berg-Munch B., 1983, *Ventilation and body odor*, Proceedings of the "American Engineering Foundation Conference on Management of Atmospheres in Tightly Enclosed Spaces", Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers, Inc.

Fracastoro G.V., 1991, *La ventilazione controllata*, Il Condizionamento dell'aria, n. 12, dicembre 1991, pp. 1631-1635.

Gustafsson H, 1992, *Building materials identified as major sources for indoor air pollutants*, Swedish Council for Building Research, Stockholm.

Ihokura K., 1986, *Ein gas sensor aus zinn-dioxid für oxidierbare gase*, Der Elektroniker, Figaro Engineering, Inc., n.1.

International Energy Agency, 1987, *Minimum Ventilation Rates, Final Report of Working Phases I and II*, Annex 9, Uhdlingen.

Kirchner S., Karpe S., Cochet C., 1994, *Les odeur: indicateurs de la qualité de l'air interieur*, CSBT Magazine, n. 76.

Masoero M., 1991, *La qualità dell'aria negli ambienti interni: problemi e tecniche di controllo*, CDA , n. 12, dicembre 1991, pp. 1609-1615.

Meloni C. e Grassi C., 1990, *Inquinamento indoor e patologia respiratoria*, Il Condizionamento dell'aria, luglio 1990.

Møhlave L., 1990, *Volatile organic compounds, indoor air quality and health*, Proceedings of the 5th International Conference on Indoor Air Quality and Climate "Indoor Air '90", Toronto, Canada, 29 July - 3 August 1990, vol. 5 pp. 15-33.

Møhlave L. e Nielsen G.D., 1992, *Interpretation and limitation of the concept TVOC as an indicator of human responses to exposures of volatile organic compounds in indoor air*, Indoor Air, n.2, pp. 65-77.

Nero A.V., 1988, *Il controllo dell'inquinamento all'interno degli edifici*, Le Scienze, luglio 1988, n. 239, vol. XLI, pp.16-22.

NKB, 1991, *Indoor Climate - Air Quality*, NKB Publication n. 61E. Espoo, Finland: Nordic Committee of Building Regulations.

Olesen B.W., 1993, *International Standardization for Thermal Comfort and Ventilation Requirements*, Proceedings of the International Conference "Building Design, Technology and Occupant Well-being in Temperate Climates". American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers, Inc. 370-378, Brussels, 1993.

Patania F., 1995, *Origini, patologie e controllo dell'inquinamento da radon*, Il Condizionamento dell'aria, novembre 1995, pp. 1160-1168.

Scarano E., Calcagno C., 1975. Anal. Chem., vol. 47, pp. 1055-1065.

Scarano E., Naggar P., Belli R., 1983. Anal. Lett., vol. 16, pp. 723-730.

Scarano E., Fornaseri M., Salvetti F., 1993. Quaderni di Facoltà, Università di Roma SMFN, n.31, pp. 179-191.

SCANVAC, 1991, *Classified indoor climate systems guidelines and specifications*, Swedish Indoor Climate Institute, Stockholm, Sweden.

Seifert, B., 1990, *Regulating Indoor Air*, Proceedings of the 5th International Conference on Indoor Air Quality and Climate "Indoor Air '90", Toronto, Canada, 29 July - 3 August 1990, vol. 5 pp. 35-49.

Stevens, S.S., 1957, *On the psychophysical law*, Psychological Review, vol. 64, p. 163.

Raffellini G., Taddia C., 1990, *Tipologia degli impianti*, Il Condizionamento dell'aria, settembre 1990.

Tucker W.G., 1992, *ASHRAE 62: Ventilation for acceptable indoor air quality*, Proceedings of the 5th International "Jacques Cartier" Conference. Concordia University, Montreal, pp. 211-219.

UNI, 1974, *Calcolo del fabbisogno termico per il riscaldamento degli edifici*, Unificazione Italiana, Norma UNI 7357.

WHO, 1987, *Air Quality Guidelines for Europe*, Copenhagen, Denmark: World Health Organization Regional Office for Europe.

## INDICE

Introduzione.....	1
<b>CAPITOLO I: ASPETTI GENERALI DEL PROBLEMA .....</b>	<b>3</b>
1. Condizioni ambientali interne .....	3
2. Origini dell'inquinamento indoor .....	3
3. Sorgenti inquinanti indoor .....	4
4. Qualità dell'aria di un ambiente interno.....	5
4.1. Qualità percepita dell'aria .....	5
4.2. "Olf e decipol" .....	6
4.3. Ventilazione .....	9
<b>CAPITOLO II: INQUINANTI INDOOR.....</b>	<b>12</b>
1. Classificazione degli inquinanti indoor.....	13
2. Effetti dell'inquinamento sull'organismo umano .....	14
3. Inquinanti indoor e relative sorgenti.....	15
4. Disamina delle principali sostanze inquinanti presenti negli ambienti indoor.....	19
<b>CAPITOLO III: NORMATIVE IN MATERIA DI VENTILAZIONE.....</b>	<b>33</b>
1. Principali Enti e Normative .....	33
1.1. Lo Standard ASHRAE 62-1989.....	35
1.2. Linee-guida europee e proposta di norma CEN .....	37
2. Confronto fra standard differenti.....	37
<b>CAPITOLO IV: LINEE-GUIDA EUROPEE E PROGETTO DI NORMA CEN.....</b>	<b>39</b>
1. Descrizione delle linee-guida europee .....	39
2. Applicabilità delle procedure .....	46
3. Esempi di determinazione di tassi di ventilazione .....	47
4. Progetto di norma CEN .....	50
5. Considerazioni sull'applicabilità della procedura.....	52
6. Proposta di una metodologia rigorosa di analisi.....	55
<b>CAPITOLO V: STRATEGIE DI DIAGNOSTICA E CONTROLLO DELLA QUALITA' DELL'ARIA INDOOR.....</b>	<b>60</b>
1. Tecniche di riduzione delle emissioni inquinanti.....	61
2. Figure giuridiche responsabili.....	63
3. Indagini sulla qualità ambientale interna per mezzo di questionari.....	63
4. Abaco per la determinazione del massimo carico di inquinamento tollerabile in un edificio.....	67



CAPITOLO VI: METODOLOGIE DI DIAGNOSTICA E MISURA DELLA QUALITÀ DELL'ARIA.....	70
1. Misure di qualità dell'aria .....	70
1.1. Misure riferite alle persone.....	71
1.2. Misure riferite all'aria.....	74
2. Strumentazione tecnica per misure riferite all'aria.....	75
BIBLIOGRAFIA.....	86