

**UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI BOLOGNA**

**FACOLTA' DI INGEGNERIA**  
**Corso di Laurea in Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio**

**Corso: FISICA TECNICA AMBIENTALE**  
**Docente: Prof. Massimo Garai**

**INQUINAMENTO DELL'ARIA IN AMBIENTI CONFINATI**

**Tesina integrativa di: Andrea Artusi**

**Numero di matricola: 2151-55969**

**Anno Accademico 1998-99**

**Copyright 1999-2000**

## Indice

Indice.....	1
1. Introduzione.....	2
2. Inquinanti dell’aria in ambienti confinati.....	3
2.1. Tipologie.....	3
2.1.1. Inquinanti chimici.....	4
2.1.2. Inquinanti fisici .....	7
2.1.3. Inquinanti biologici .....	7
2.2. Rischi per la salute .....	8
2.3. La “Sick building syndrome” .....	10
2.3.1. Criteri per la definizione della SBS.....	10
2.3.2. Possibili cause della SBS.....	10
2.3.3. Modalità d’esame dell’edificio .....	11
2.3.4. Possibili soluzioni.....	11
2.4. Effetti dell’umidità relativa sugli inquinanti indoor .....	12
2.4.1. Inquinanti di origine biologica potenzialmente correlati al livello di umidità... 12	
2.4.2. Inquinanti di origine non biologica .....	14
3. La percezione della qualità dell’aria in ambienti confinati.....	14
3.1. La teoria di Fanger .....	15
4. Controllo dell’inquinamento dell’aria in ambienti confinati .....	19
4.1. Valutazione dell’inquinamento indoor e monitoraggio della qualità dell’aria interna .	19
4.2. Ventilazione e qualità dell’aria in ambienti confinati .....	20
4.2.1. Problemi relativi alla ventilazione e possibili soluzioni .....	21
4.2.2. Ventilazione e normative .....	22
4.2.3. Depuratori d’aria .....	26
4.2.4. Condizionatori d’aria.....	26
Riferimenti bibliografici.....	28
Testi:.....	28
Riviste: .....	28
Internet: .....	28

## 1. Introduzione

Negli ultimi cinquant’anni si è potuto osservare, in particolare in Europa e America Settentrionale, uno spaventoso incremento dell’inquinamento atmosferico; ciò costituisce una reale fonte di pericolo per il benessere e la salute dell’uomo, nonché per la sopravvivenza di interi ecosistemi. Si è pertanto sviluppata a livello internazionale una forte attenzione per questa importante problematica che ha portato, attraverso l’adozione di particolari misure quali il controllo delle emissioni e l’imposizione di concentrazioni massime consentite, ad una significativa riduzione di alcuni contaminanti nell’ambiente atmosferico ed a una conseguente percepibile inversione di tendenza per alcune patologie ad essi correlate.

Per contro, ad un parziale contenimento dell’inquinamento dell’aria dell’ambiente esterno (*outdoor*), negli ultimi vent’anni si è andata contrapponendo la presa di coscienza, da parte della comunità scientifica internazionale che si occupa di sanità pubblica, del problema della contaminazione dell’aria negli ambienti confinati (*indoor*). La qualità dell’aria indoor è una tematica da prendere nella giusta considerazione in virtù del fatto che ha riflessi importanti per la salute e il benessere dell’uomo: l’inquinamento indoor può infatti causare tutta una serie di effetti indesiderati, dal disagio sensoriale fino a gravi conseguenze sullo stato di salute.

Indubbiamente alcuni fattori hanno portato ad accrescere l’importanza dell’inquinamento indoor, primo fra tutti la progressiva “terziarizzazione” delle attività: numerosi studi inerenti l’utilizzo del tempo da parte di diversi gruppi di popolazioni nei paesi maggiormente sviluppati hanno dimostrato che le persone trascorrono pochissimo tempo all’aperto (mediamente il 2 per cento delle 24 ore nel caso di adulti impiegati in giorni infrasettimanali, a fronte del 60 per cento a casa, del 30 per cento al lavoro e del restante 8 per cento all’interno di altre strutture o in viaggio). Pertanto la fonte di esposizione principale per alcuni inquinanti - e l’unica per altri - è rappresentata dalla contaminazione indoor. Il problema è ancora più importante se si considera che esistono alcune fasce della popolazione particolarmente ricettive nei confronti degli inquinanti atmosferici (gli anziani, gli asmatici, i bronchitici, i bambini) che possono vivere anche per larga parte del loro tempo in ambienti chiusi.

Parallelamente si è registrato un peggioramento della qualità dell’aria indoor, con un progressivo aumento delle sostanze inquinanti. Cause ipotizzabili sono:

- la crisi delle risorse energetiche mondiali (legata alla crisi del Medio Oriente e al suo impatto sul mercato del petrolio) intorno ai primi anni ’70, quando per evitare sprechi energetici si preferì costruire strutture edilizie sempre più isolate rispetto all’ambiente esterno, grazie alla massiccia introduzione di isolanti termici sintetici, caratterizzate dalla sempre minor presenza delle infiltrazioni d’aria e di ventilazione (diminuzione degli standard minimi raccomandati) ed infine dall’aumento del riciclo dell’aria interna;
- i nuovi elementi strutturali e di dotazione tecnologica iniziale dell’edificio (materiali da costruzione, rivestimenti vari, impianti di riscaldamento e condizionamento), le rilevanti modifiche degli arredi fissi e mobili (a livello di nuovi materiali e nuovi prodotti di trattamento e pulizia/manutenzione) e degli strumenti di lavoro (crescente utilizzo di fotocopiatrici, stampanti laser, videoterminali, ecc.);
- le modalità d’uso degli spazi, influenzate anche dallo stile di vita e di lavoro;
- la frequente presenza di fumo di sigaretta negli ambienti confinati.

Infine, il peso sociale complessivo causato dai problemi di qualità dell’aria va considerato non solo in termini di effetti sulla salute dell’uomo, ma anche in termini di costi economici e riduzione della produttività e del benessere della popolazione.

## 2. Inquinanti dell’aria in ambienti confinati

### 2.1. Tipologie

Senza entrare nel merito del mondo produttivo industriale, è possibile riscontrare in ambienti confinati numerose sorgenti di diversi tipi di inquinanti. Eccone alcuni esempi:

AMBIENTE	FONTI ED INQUINANTI
CASA	<b>Sorgenti di natura metabolica:</b> CO <sub>2</sub> , NH <sub>3</sub> , odori <b>Fumo di tabacco:</b> particolato respirabile (PM 10), monossido di carbonio (CO), composti organici volatili (VOC) <b>Fornelli a gas:</b> NO <sub>2</sub> , CO <b>Forni a legna e camini:</b> PM10, CO, idrocarburi policiclici aromatici (IPA) <b>Materiali da costruzione:</b> radon e formaldeide <b>Terreno sottostante i fabbricati:</b> radon <b>Mobili e prodotti per la casa:</b> VOC, formaldeide <b>Riscaldamento a gas:</b> NO <sub>2</sub> , CO <b>Riscaldamento a kerosene:</b> NO <sub>2</sub> , CO, SO <sub>2</sub> <b>Isolanti:</b> asbesto <b>Agenti esterni:</b> CO, ossidi di azoto, idrocarburi, particolato aerodisperso
UFFICIO	<b>Sorgenti di natura metabolica:</b> CO <sub>2</sub> , NH <sub>3</sub> , odori <b>Fumo di tabacco:</b> PM10, CO, VOC <b>Materiali da costruzione:</b> VOC, formaldeide <b>Arredamento:</b> VOC, formaldeide <b>Fotocopiatrici:</b> VOC <b>Condizionatori:</b> agenti biologici <b>Agenti esterni:</b> CO, ossidi di azoto, idrocarburi, particolato aerodisperso
TRASPORTI	<b>Aria ambiente:</b> ozono negli aerei, CO e idrocarburi in automobile <b>Condizionatori per auto:</b> agenti biologici

**Tabella 1.** Inquinanti tipici di diversi ambienti confinati.

I principali inquinanti degli ambienti interni possono essere poi suddivisi secondo l’origine prevalente, e quindi classificati in base al rapporto indoor/outdoor, che, se superiore all’unità esprime un’origine dell’inquinante prevalentemente interna all’ambiente confinato, se inferiore ne indica invece un’origine prevalentemente esterna.

INQUINANTE	FONTI PRINCIPALI	CONCENTRAZIONI TIPICHE	IN/OUT
Ossidi di zolfo	Processi di combustione	0,15 mg/m <sup>3</sup>	<1
Ozono	Reazioni fotochimiche	0-10 ppb	<<1
Pollini	Alberi/graminacee	variabili	≤1
Idrocarburi	Processi di combustione	1-50 ppb	≤1

**Tabella 2.** Inquinanti indoor d’origine prevalentemente esterna.

INQUINANTE	FONTI PRINCIPALI	CONCENTRAZIONI TIPICHE	IN/OUT
Formaldeide	Truciolati, isolanti termici, mobili, colle	0.001-0.5 ppm	>>1
Amianto e fibre minerali.	Ignifughi, isolanti, ecc.	0-1 fibre/ml	≥1
Sostanze organiche	Adesivi, solventi, cottura, pulizia	Variabile	>1
Sostanze allergeniche	Polvere, peli animali, insetti, tessuti	Variabile	>1
Batteri e funghi	Contaminazione crociata	≥100 ufc/m <sup>3</sup>	≥1

**Tabella 3.** Inquinanti indoor d’origine prevalentemente interna.

Un altro tipo di suddivisione possibile è quello a seconda della categoria di appartenenza: si distingueranno così inquinanti di tipo chimico, fisico e biologico.

#### 2.1.1. *Inquinanti chimici*

Sono presenti nell’aria indoor sotto forma di miscele complesse; alcuni hanno origine all’interno degli ambienti stessi, altri penetrano con l’aria esterna tramite fessurazioni nelle strutture edilizie o in corrispondenza degli infissi, soprattutto in occasione di fenomeni di elevato inquinamento esterno.

Tra i principali contaminanti chimici si annoverano prodotti di combustione come SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub> e CO, fumo di tabacco e composti organici volatili.

##### **- Ossidi di azoto**

Quelli rilevanti dal punto di vista biologico sono il biossido di azoto (NO<sub>2</sub>) e l’ossido di azoto (NO). Sono emessi da processi di combustione, principalmente da bruciatori a gas o a combustibili liquidi, da cucine a gas o da riscaldatori per l’acqua, per quanto riguarda gli ambienti confinati.

Le concentrazioni interne superano largamente quelle esterne, anche considerando per queste ultime i picchi registrati in condizioni pesanti di inquinamento atmosferico. Durante la cottura dei cibi si possono raggiungere nelle cucine valori medi orari di 2000 µg/m<sup>3</sup> con picchi in alcuni minuti fino a 4000 µg/m<sup>3</sup>.

Valori capaci di alterare la funzionalità respiratoria per brevi esposizioni sono dell’ordine di  $560 \mu\text{g}/\text{m}^3$  nei soggetti asmatici e di  $1880 \mu\text{g}/\text{m}^3$  nei soggetti sani. Per questi motivi sono stati proposti, e in certi paesi come il Canada adottati, valori limite di  $480 \mu\text{g}/\text{m}^3$  per brevi esposizioni e di  $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$  per esposizioni prolungate.

#### **- Monossido di carbonio**

Nell’aria esterna dei centri urbani intensamente trafficati, le concentrazioni di CO raggiungono valori superiori a 60 ppm a fronte di un fondo naturale praticamente trascurabile.

Pur senza considerare le fonti esterne di inquinamento, si hanno concentrazioni intramurali di CO di un certo rilievo quando nei locali vi sono processi di combustione ed i sistemi di aspirazione dei fumi non sono ottimali: per esempio nelle cucine si arriva a concentrazioni di 5-10 ppm e in ambienti riscaldati con stufe a gas a 25-50 ppm.

Il CO inalato si lega con l’emoglobina, formando la carbossiemoglobina ed impedendo il normale trasporto dell’ossigeno ai tessuti periferici; esposizioni per 8 ore a 25 ppm, che comportano una carbossiemoglobinemia del 3-5%, sono in grado di determinare un aggravamento dell’angina pectoris.

E’ stato quindi proposto e generalmente accettato un limite di concentrazione di  $10 \text{mg}/\text{m}^3$ .

#### **- Anidride solforosa**

E’ liberata da processi di combustione, limitatamente agli impianti in cui si bruciano combustibili fossili ricchi di zolfo, quali carbone e gasolio. Si raggiungono così valori intorno ai  $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , vicini alle medie annuali dell’aria atmosferica di molti centri urbani, comunque inferiori a quelli stabiliti dagli standard di vari paesi ed a quelli consigliati dall’Organizzazione Mondiale della Sanità (OMS) per esposizioni prolungate ( $350 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ).

#### **- Particolato aerodisperso**

Solidi sospesi nell’aria confinata sono sempre presenti, o perché provengono dall’esterno o per usura di superfici e materiali esistenti negli ambienti o perché prodotti da processi di combustione. La più rilevante sorgente di inquinamento indoor è tuttavia rappresentata dal fumo di tabacco, in presenza del quale si rilevano concentrazioni di breve periodo fino a  $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$  in inverno ed a  $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$  in estate. Si tratta di valori comunque inferiori a quelli rilevati nell’aria esterna di centri urbani; che rientrano anche nei limiti consigliati dall’OMS per brevi esposizioni ( $125 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) e per esposizioni croniche ( $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ).

In ogni caso si è dimostrata una significativa correlazione tra esposizione acuta a particolato aerodisperso e vari tipi di malattie respiratorie, anche mortali; il cancro al polmone è stato in particolare associato a esposizione cronica a particolato di combustione.

#### **- Composti organici volatili (VOC)**

Appartengono a questa classe numerosi composti tra cui idrocarburi alifatici, aromatici e clorurati, aldeidi, terpeni, alcoli, esteri e chetoni.

Le concentrazioni dei composti organici volatili sono solitamente maggiori negli ambienti indoor rispetto all’aria esterna. I VOC sono sempre presenti negli ambienti confinati essendo legati all’uso di colle, vernici impiegate in arredi a base di truciolato, di deodoranti e termicidi; causano formazione di VOC i processi di combustione, come il fumo di sigaretta e lo stesso metabolismo umano. Alcuni sono particolarmente nocivi, come la formaldeide, trattata nel seguito.

La misura dei composti organici totali (TVOC) è un mezzo per verificare gli effetti di un ambiente inquinato sulla salute o sul benessere dell’uomo, divenendo così una sorta di indicatore della qualità dell’aria, così come la CO<sub>2</sub> e l’NH<sub>3</sub> lo sono per i bioeffluenti.

#### **- Formaldeide**

Composto organico in fase di vapore emesso particolarmente da resine urea-formaldeide usate per l’isolamento termico (UFFI) e da resine usate per truciolato e compensato di legno, per tappezzerie, moquette e altro materiale da arredamento. Negli edifici moderni le concentrazioni indoor superano notevolmente quelle esterne, inclusi i picchi determinati presso strade di grande traffico. Esistono peraltro anche altre sorgenti interne di formaldeide, come il fumo di tabacco e i processi di combustione utilizzati per la preparazione dei cibi o per il riscaldamento di ambienti.

Gli effetti della formaldeide vanno da irritazioni oculari e delle prime vie aeree per concentrazioni nell’ordine del mg/m<sup>3</sup> fino a polmoniti, edemi polmonari a concentrazioni intorno a 50 mg/m<sup>3</sup>. Su queste basi l’OMS ha proposto un limite da non superare di 60 µg/m<sup>3</sup>.

#### **- Fibre minerali**

Comprendono materiali fibrosi naturali, fra cui l’amianto (asbesto), e fibre artificiali come la lana di vetro e la lana di roccia. Questi materiali hanno trovato vasto impiego soprattutto come isolanti o coibenti e, secondariamente, come materiali di rinforzo e di supporto.

Le concentrazioni esterne di amianto oscillano tra 0,1 e 4 fibre/litro, mentre negli edifici con presenza di amianto vanno da 1 a 10 fibre/litro nei casi migliori e da 50 a 200 fibre/litro nei casi peggiori. Per elevate concentrazioni vi è rischio di cancro del polmone e di mesotelioma, una rara neoplasia della pleura strettamente correlata all’esposizione all’asbesto.

L’amianto è stato utilizzato in svariati campi di applicazione fino all’inizio degli anni ’90, quando sono stati finalmente riconosciuti anche a livello legislativo i rischi per la salute derivanti dal suo utilizzo introducendo norme per la sua limitazione e successivamente per il divieto d’uso.

Essendo molteplici le caratteristiche applicative dell’amianto è logico prevedere che la sua sostituzione non sia effettuata con un unico prodotto, ma necessariamente con una serie di materiali che, a seconda delle diverse applicazioni, possono dare i migliori risultati. I principali materiali sostitutivi sono: lana di vetro, lana di roccia, lana di scoria, filamenti di vetro e altre fibre artificiali (polipropilene) o naturali (cellulosiche). Le valutazioni tossicologiche su questi prodotti sono ancora in corso: la IARC (Agenzia Internazionale per la Ricerca sul Cancro), facendo il punto della situazione nel 1988, classificò i primi tre materiali sopra nominati come possibili cancerogeni per l’uomo; la Commissione Consultiva Tossicologica Nazionale (CCTN) del Ministero della Sanità ha ritenuto di non dover inserire fibre di vetro, lana di vetro, lana di roccia e fibre ceramiche nella lista dei cancerogeni in quanto le evidenze epidemiologiche disponibili attualmente e il risultato degli esperimenti sugli animali non permettono di concludere che esiste una convincente evidenza di cancerogenicità.

Oltre agli effetti cancerogeni si stanno studiando anche gli altri effetti sulla salute: è confermata la possibilità di insorgenza in operatori che manipolano fibre di vetro e/o lana di vetro e/o lana di roccia di rinite, faringite, bronchite acuta e dermatosi irritativa.

### 2.1.2. *Inquinanti fisici*

#### **- Radon**

Gas radioattivo che si forma dalla disintegrazione del radio-226. Il radon a sua volta si disintegra generando una serie di radionuclidi instabili come il polonio-218, il piombo-214, il bismuto-214 e il polonio-214 che, per la loro bassa tensione di vapore, si ritrovano come particelle solide sospese. Si ha quindi la possibilità che queste si depositino sulle mucose bronchiali cedendo energia e provocando una trasformazione neoplastica delle cellule dell’apparato respiratorio.

Il radon viene emesso dal suolo in misura variabile in funzione delle caratteristiche geolitologiche: i valori più alti si hanno in corrispondenza di zone vulcaniche dove abbondano tufi e lave. Le concentrazioni interne agli edifici sono determinate quindi dal tipo di suolo sottostante, dalla presenza o meno di sistemi di isolamento dal suolo, dal tipo di materiali di costruzione utilizzati. La ventilazione degli edifici ne abbassa proporzionalmente la concentrazione, sicchè i valori più alti si avranno in inverno e, negli edifici dotati di impianti di condizionamento, quanto più è alto il rapporto di ricircolo.

Ricerche condotte in paesi europei hanno dimostrato concentrazioni medie di radon intorno ai 50 Bq/m<sup>3</sup>. In Italia è stata rilevata una radioattività superficiale elevata soprattutto nelle zone vulcaniche, con profonde faglie tettoniche, del Lazio e della Campania. Recenti studi hanno individuato in 117 Bq/m<sup>3</sup> il valore medio della concentrazione di radon nelle abitazioni lombarde, a fronte di un valore medio nazionale di 77 Bq/m<sup>3</sup>, mentre il valore medio mondiale stimato dal Comitato Scientifico delle Nazioni Unite pare si aggiri intorno ai 40 Bq/m<sup>3</sup>. Si tratta di valori non trascurabili sia in assoluto sia poiché il radon rappresenta per la totalità della popolazione la maggior sorgente di esposizione alla radioattività.

Per tali motivi esistono varie proposte di abbassamento dei limiti proposti nel 1987 dall’OMS: 400 Bq/m<sup>3</sup> per gli edifici esistenti e 200 Bq/m<sup>3</sup> per quelli di nuova costruzione.

È importante citare l’azione “pionieristica” della Regione Lombardia che, in attesa di norme più vincolanti, ha preso in considerazione l’argomento. La Disposizione della Regionale “*Interventi di sorveglianza negli ambienti di vita e negli ambienti di lavoro*” dell’aprile 1991 offre un’ampia informativa sul radon, sulla sua provenienza, su conseguenze e limiti d’esposizione come definiti dagli Organismi Internazionali. La relazione “*Realizzazione di misure di concentrazione di radon in ambienti chiusi al fine di tutela della salute*” dell’agosto 1991 specifica metodologie di misura, livelli di riferimento, modalità e protocolli per la rilevazione dei dati.

Ciò per concludere che:

- il “problema radon” deve essere affrontato quanto prima dalle pubbliche amministrazioni e dal privato per non essere colti impreparati dalle nuove norme;
- indagini preliminari sul territorio e preventive sugli edifici in fase progettuale consentiranno un forte risparmio in quanto i costi di risanamento per abitazioni esistenti sono enormemente più elevati;
- una programmazione di queste attività permetterà di affrontare il problema in modo razionale evitando allarmi nella popolazione.

### 2.1.3. *Inquinanti biologici*

Si è sviluppato recentemente un nuovo interesse nei confronti della contaminazione biologica dell’aria degli ambienti confinati per il fatto che microrganismi patogeni sono

---



amplificati e aerodispersi soprattutto negli ambienti dotati di impianti per la climatizzazione dell’aria.

Gli agenti biologici presenti negli spazi confinati sono particelle organiche (bioaerosol) costituite da microrganismi (in particolare virus, batteri e muffe), insetti (acari) e materiale biologico da essi derivato o materiale organico di origine vegetale (pollini).

Le principali fonti di inquinamento biologico degli ambienti indoor sono gli occupanti, la polvere, le strutture e i servizi degli edifici stessi. In merito a quest’ultimo tipo di fonte è importante citare gli umidificatori e i condizionatori d’aria, nei quali l’elevata umidità e una non attenta manutenzione facilitano l’insediamento e la moltiplicazione dei microrganismi che vengono poi diffusi negli ambienti dall’impianto di distribuzione dell’aria.

Altri tipici “serbatoi di contaminanti biologici” sono le torri di raffreddamento degli impianti di condizionamento e i serbatoi e le tubature della rete idrica ad uso domestico.

## **2.2. Rischi per la salute**

L’esposizione umana ad inquinanti indoor è difficilmente quantificabile essendo legata a variabili specifiche di ogni microambiente e di ogni soggetto ed essendo inoltre estremamente variabile il livello di inquinamento nelle abitazioni in funzione delle sorgenti presenti nell’edificio, della ventilazione e delle abitudini degli occupanti.

Gli effetti sulla salute dell’uomo derivanti dall’inquinamento dell’aria si manifestano più comunemente a livello dei polmoni. Gli effetti acuti possono includere anche sintomi non respiratori dipendenti soprattutto dalle caratteristiche tossicologiche degli inquinanti o da aspetti non completamente noti.

A volte può essere difficoltoso individuare il rapporto causa-effetto, poiché spesso i sintomi non sono specifici e gli inquinanti responsabili di uno stesso effetto possono essere più di uno. Capita inoltre che numerosi effetti si manifestino grazie ad una contemporanea presenza di stress, pressioni lavorative, discomfort di origine stagionale, senza contare che la risposta degli individui ad una stessa esposizione ad un inquinante ambientale può comunque variare a seconda di varie condizioni individuali o del diverso grado di suscettibilità personale.

Inoltre bisognerebbe tenere conto, per lo meno a livello qualitativo, dell’effetto combinato che sussiste in condizioni di inquinamento dell’aria interna, elevata temperatura e rumore eccessivo. Alcune ricerche hanno cercato di valutare l’importanza relativa, in condizioni ambientali controllate, dei tre fattori summenzionati: allo scopo sono stati effettuati una serie di esperimenti con un gruppo di persone, utilizzando due identiche camere di prova; questi soggetti sono stati esposti a condizioni termiche e di qualità dell’aria variabili e a differenti livelli sonori. La variazione di 1°C di temperatura operativa, fra 23°C e 29°C, ha sortito lo stesso effetto sullo stato di benessere dell’uomo di una variazione di 2,4 decipol della qualità dell’aria percepita (cfr. capitolo 3) o di 3,9 dB del livello di pressione sonora.

Qualche anno fa negli Stati Uniti, l’Environmental Protection Agency ha tentato, nell’ambito di un importante studio, una classificazione degli effetti sulla salute di alcuni tra i più importanti inquinanti indoor sull’intera popolazione statunitense, stimata in circa 240 milioni di abitanti. A tal fine, approssimando abbastanza brutalmente i risultati ottenuti, è stata ideata una matrice capace di scorporre gli effetti in gravi o lievi, limitati o diffusi.

SEGMENTO DI POPOLAZIONE	EFFETTI GRAVI	EFFETTI LIEVI
> 10% DELLA POPOLAZIONE	Effetti gravi e diffusi	Effetti lievi e diffusi
< 10% DELLA POPOLAZIONE	Effetti gravi in n. limitato	Effetti lievi in n. limitato

**Tabella 4.** Matrice per la valutazione dell’importanza degli effetti degli inquinanti indoor.

INQUINANTE	STIMA DELLA POPOLAZIONE ESPOSTA	TIPO DI IMPATTO
Contaminanti biologici	> 10%	0,5-1 milioni di ricoveri
Radon	> 25%	5.000-20.000 K polmonari/anno
Fumo di tabacco	> 75%	3.000-5.000 decessi/anno
Benzene	> 50%	>300 casi di leucemia
Formaldeide	> 20%	>300 casi di cancro/anno

**Tabella 5.** Valutazione dell’impatto sulla salute degli inquinanti indoor negli U.S.A.  
 Effetti gravi e diffusi.

INQUINANTE	STIMA DELLA POPOLAZIONE ESPOSTA	TIPO DI IMPATTO
Intossicazione da CO	<5%	1500 decessi/anno
Amianto	<2%	>200 casi di cancro/anno
Stufe a kerosene	<2%	malattie respiratorie, tumori
Radiaz. non ionizzanti	<10%	tumori

**Tabella 6.** Valutazione dell’impatto sulla salute degli inquinanti indoor negli U.S.A.  
 Effetti gravi e limitati.

INQUINANTE	STIMA DELLA POPOLAZIONE ESPOSTA	TIPO DI IMPATTO
Fastidio da composti organici	>75%	Fastidio, mal di testa, irritazione oculare
Scarsa ventilazione	>75%	Fastidio, affaticamento, ridotta produttività

**Tabella 7.** Valutazione dell’impatto sulla salute degli inquinanti indoor negli U.S.A.  
 Effetti lievi e diffusi.

INQUINANTE	STIMA DELLA POPOLAZIONE ESPOSTA	TIPO DI IMPATTO
Emissioni odorose da composti sintetici	<10%	Fastidio, lamentele
Eccessivo affollamento	<5%	Scarso comfort, stress mentale

**Tabella 8.** Valutazione dell’impatto sulla salute degli inquinanti indoor in U.S.A. Effetti lievi e limitati

Le ultime due tabelle pongono in rilievo con evidenza come varie alterazioni del comfort possono coinvolgere ampi settori di popolazione in quella che ormai viene abitualmente definita come “Sick building syndrome”(SBS), ovvero sindrome da edificio malato.

### 2.3. La “Sick building syndrome”

In una relazione della Commissione Nazionale per l’inquinamento degli ambienti confinati del 1991, il termine “Sick building syndrome” è stato utilizzato per definire “un edificio malato nel quale le persone che vi soggiornano lamentano patologie che possono essere messe in relazione con l’inalazione dell’aria in esso contenuta”. L’Organizzazione Mondiale della Sanità definisce invece la SBS come una reazione al microclima che colpisce la maggior parte degli occupanti e che non può essere correlata con una causa evidente, quale un’eccessiva esposizione a un singolo agente o un difetto del sistema di ventilazione. I malesseri sono avvertibili solo ed esclusivamente durante la permanenza all’interno; possono essere localizzati solo a determinate stanze o settori, oppure generalizzati nell’intero edificio.

Diversamente, la sigla BRI (“Building Related Illness”), ovvero Malattia Correlata all’Edificio, sta ad indicare una malattia particolare ben identificata, causata dalla presenza di determinati inquinanti in sospensione nell’aria di un ambiente chiuso.

#### 2.3.1. Criteri per la definizione della SBS

- un’alta percentuale degli occupanti l’edificio deve essere reattiva;
- i sintomi osservabili devono appartenere a reazioni acute fisiologiche o sensoriali (irritazioni delle mucose e della cute, lacrimazione, cefalea, secchezza della pelle, lievi sintomi di tipo asmatico o allergico, percezione di odori o sapori sgradevoli) o essere reazioni psicosociali (riduzione della produttività, assenteismo, ricorso a medicazioni o ad assistenza sanitaria primaria);
- modesta frequenza di sintomi sistemici;
- nessun rapporto causale con una notevole esposizione a singoli agenti.

#### 2.3.2. Possibili cause della SBS

I fattori riconosciuti come possibili cause di questa sindrome sono:

- ventilazione insufficiente: a causa della summenzionata crisi energetica dei primi anni settanta, il volume d’aria esterna di ricambio raccomandato per persona scese da 15 m<sup>3</sup>/h a

5 m<sup>3</sup>/h. Quasi sempre un livello così basso d’aria esterna è del tutto insufficiente a mantenere salute e comfort degli occupanti. Lo standard ASHRAE 62/1989 ha portato poi il flusso di ricambio adeguato a 20 m<sup>3</sup>/h pro capite negli uffici e a 60 m<sup>3</sup>/h per locali particolari;

- presenza di contaminanti chimici da fonti interne: adesivi, moquette, rivestimenti, mobili, macchine fotocopiatrici, insetticidi, detergenti emettono vari tipi di VOC; CO, ossidi di azoto e particolato respirabile sono prodotti da stufe a gas o cherosene e sono presenti nel fumo di sigaretta;
- presenza di contaminanti chimici da fonti esterne: gas di scarico delle auto, aria viziata espulsa da altri impianti. Inquinanti esterni si infiltrano nell’edificio tramite griglie e prese d’aria generalmente disposte in modo improprio;
- presenza di contaminanti biologici: batteri, muffe, pollini, virus possono facilmente attecchire nell’acqua stagnante che si può formare nei condotti, negli umidificatori, nei raccoglitori di condensa.

E’ possibile la combinazione di questi con altri fattori come condizioni non idonee di temperatura, umidità, illuminazione e rumorosità ambientale, determinando una generale diminuzione del comfort ambientale ed un conseguente rischio per la salute.

### 2.3.3. *Modalità d’esame dell’edificio*

Si effettua un’investigazione per identificare e risolvere gli inconvenienti legati alla qualità dell’aria per evitare che si ripresentino. I quattro fattori principali che influenzano l’indoor air quality sono gli occupanti, l’impianto di condizionamento (se esiste), le possibili fonti di inquinanti, e le loro vie di accesso.

Nonostante l’analisi dell’aria appaia il passo più logico da compiere, raramente questa fornirà risultati significativi: a parte casi eccezionali le concentrazioni dei singoli inquinanti risulteranno al di sotto dei livelli ammessi dagli standards. Può rivelarsi molto utile la verifica del quadro igro-termico dell’ambiente e dei percorsi di movimentazione dell’aria. Non è insomma conveniente ricorrere al campionamento e all’analisi chimica dell’aria alla ricerca dei vari inquinanti se prima non sono state svolte un’attenta raccolta e una valutazione dei dati fisici ambientali. Si nota infatti che se esistono i presupposti di temperatura, umidità e substrato specifico saranno certamente presenti significative quantità di inquinanti biologici come le muffe con elevate concentrazioni dei loro metaboliti tossici (VOC) e allergenici (spore).

### 2.3.4. *Possibili soluzioni*

La soluzione risolutiva per questo tipo di problema sarà difficilmente unica; più realisticamente potrebbe essere una combinazione delle seguenti misure:

- eliminazione alla fonte, quando gli inquinanti sono ben identificati e il loro controllo è tecnicamente fattibile;
  - aumento della quantità d’aria esterna di ricambio e miglioramento della sua distribuzione; è il mezzo che presenta il miglior rapporto costo/beneficio per abbattere la concentrazione degli inquinanti;
  - depurazione: la depurazione è sicuramente un ausilio efficace al controllo delle fonti di inquinamento ed alla ventilazione; i depuratori devono essere dotati di filtri ad alta efficienza, in grado di trattenere sia il particolato respirabile (filtri media HEPA o
-

elettrostatici) che le sostanze gassose o sotto forma di vapore (letti adsorbiti in carbone attivo). Ne esistono di automatici attivati da sonde che entrano in funzione solo quando necessario e sono in grado di regolare l’immissione di aria esterna in funzione delle concentrazioni di inquinanti;

- informazione e comunicazione tra occupanti, responsabili e personale tecnico.

## **2.4. Effetti dell’umidità relativa sugli inquinanti indoor**

Può essere di grande interesse analizzare la relazione esistente tra umidità, benessere e salute dell’uomo in ambienti confinati. Gli standard ASHRAE raccomandano un livello massimo per l’umidità relativa variabile dal 60% all’80%: tassi troppo elevati possono infatti comportare effetti deleteri per comfort e salute, favorendo il moltiplicarsi e la diffusione di molti contaminanti biologici e agenti infettanti, nonché potenziando l’effetto di altri inquinanti di tipo chimico come la formaldeide, gli ossidi di azoto e di zolfo.

### *2.4.1. Inquinanti di origine biologica potenzialmente correlati al livello di umidità*

#### **- Acari della polvere**

Sono considerati i maggiori responsabili delle allergie respiratorie nelle zone a clima umido e temperato. In realtà i responsabili veri e propri delle allergie sono i detriti corporei e le feci di questi microscopici insetti. Le dimensioni dell’insetto adulto sono circa un terzo di mm, mentre i suoi detriti hanno diametri anche inferiori a 5 micron e quindi sono inalabili in profondità nei polmoni causando sovrapproduzione di IgE e quindi lo scatenarsi dell’allergia. Si è dimostrato che tassi di umidità ambientale superiori al 50% portano ad un peggioramento delle allergie da acari della polvere.

Gli acari sono costituiti per il 70% da acqua, che assumono costantemente tramite il vapore acqueo atmosferico direttamente assorbito per mezzo di una secrezione salina soprassatura. Le condizioni termo-igrometriche ottimali per il loro sviluppo sono rappresentate da un 70%-80% di umidità relativa e un intervallo di temperatura tra 17° e 32°C. Per sopravvivere si nutrono poi dei residui cornei rilasciati dalla cute dell’uomo e degli altri animali.

Gli acari si trovano in notevole quantità in cuscini e materassi, grazie all’abbondanza di cibo ed alle condizioni ideali di temperatura e umidità presenti in un letto occupato rispetto all’ambiente circostante. Anche i tappeti folti sono un luogo ideale per il loro sviluppo, visto che mediamente la temperatura dei pavimenti è di 3,7°C inferiore a quella dell’aria ambiente: ciò comporta che l’umidità relativa a livello dei tappeti è in genere più alta di quella ambientale del 9,6%.

Tipicamente la contaminazione da acari colpisce le abitazioni dove esistono parecchie fonti localizzate di umidità, mentre l’impiego di condizionatori e deumidificatori non è ancora abbastanza diffuso.

Possibili rimedi: le soluzioni più efficaci per combattere gli acari, a parte la pulizia con aspirapolvere particolari, la rimozione dei tappeti a pelo lungo, l’uso di acaricidi, consistono nell’impiego di termocoperte e deumidificatori. Le termocoperte, riscaldando il materasso quando il letto non è in uso, abbassano l’umidità relativa riducendo la popolazione di acari fino all’84%.

#### **- Muffe**

Causano allergie, anche se meno frequenti, e altre forme patologiche pericolose come la micotossicosi oppure infezioni vere e proprie a carico di vari organi.

Le muffe si nutrono di legno, cellulosa, fibre vegetali, colle e vernici contenenti sostanze proteiche. Possono comunque attecchire anche su superfici metalliche o plastiche, in presenza di depositi nutrienti: tipico esempio è la proliferazione di colonie fungine sui rivestimenti isolanti e fonoassorbenti all’interno delle condotte dell’aria condizionata, con relativa diffusione di spore direttamente in ambiente.

La crescita delle colonie è influenzata dall’umidità superficiale, più che dall’umidità relativa ambientale; la formazione di condensa è condizione ottimale per il loro moltiplicarsi. L’idoneità allo sviluppo delle muffe in un dato materiale di rivestimento è in relazione al parametro di attività  $a_w$  dell’acqua contenuta nel substrato, indice definito dal rapporto tra la pressione di vapore acqueo in superficie rispetto alla pressione di vapore esistente su un film d’acqua alle stesse condizioni di temperatura e pressione atmosferica. Espresso percentualmente è detto indice di umidità relativa equivalente. In ambienti chiusi l’indice di attività dipende soprattutto dalle caratteristiche strutturali del materiale ed in misura minore dall’umidità relativa ambientale. Per limitare la crescita di colonie fungine bisognerebbe utilizzare materiali di rivestimento con indice  $a_w$  non superiore a 0,8, evitando ovviamente fenomeni di condensazione o accumulo di umidità.

E’ interessante notare come l’impiego di ampie pannellature di rivestimento in legno poroso, per esempio sulle pareti, impedisca lo sviluppo di muffe anche a livelli medio-alti di umidità relativa. Infatti l’acqua assorbita dai pori del legno viene “sequestrata” dalla cellulosa delle pareti cellulari divenendo così inaccessibile alle muffe (anche ad umidità relative molto alte, almeno fino a quando non viene raggiunto il livello di saturazione del legno, con relativa perdita di igroscopicità). I pannelli di legno poroso funzionano così come una spugna, assorbendo e cedendo grandi quantità d’acqua durante il ciclo climatico delle 24 ore, evitando la formazione di condensa superficiale, a meno che, come si è detto, l’umidità relativa non sia così alta da saturare il substrato.

Possibili rimedi: è importante controllare il livello di umidità ambientale, le fonti interne di umidità e le eventuali infiltrazioni d’acqua. Da considerare con attenzione è la manutenzione degli impianti di condizionamento: una volta in presenza di materiali contaminati da muffe è pressoché impossibile tornare a una situazione accettabile se non con il rinnovo delle strutture.

#### **- Batteri e virus**

Gli agenti patogeni infettivi trasmessi in sospensione nell’aria ambientale sono veicolati da particelle di aerosol o polveri. L’umidità ambientale influenza il diametro e il tempo di decadimento al suolo di queste particelle: alti livelli di umidità relativa determinano particelle più pesanti che precipitano più velocemente diminuendo la probabilità di trasmissione aerogena. Quindi nelle situazioni a rischio di contagio è consigliabile mantenere un’umidità relativa maggiore del 50%.

Sono pochissimi i batteri patogeni per l’uomo in grado di moltiplicarsi in ambiente, al di fuori del corpo umano: la *Legionella pneumophila* è uno di questi, causando una grave forma di polmonite, il morbo del Legionario. L’instaurarsi di colonie di *Legionella* è in relazione alla presenza di acqua stagnante di condensa all’interno degli impianti di condizionamento. Si sottolinea, comunque, che la presenza di un determinato agente patogeno nell’aria non basta a causare la malattia, ma è necessario inalare una adeguata quantità minima di microrganismi (carica infettante) per scatenare l’infezione. E’ quindi fondamentale un’adeguata ventilazione degli ambienti (raccomandazioni ASHRAE 62/1989), per ridurre la concentrazione di eventuali batteri o virus infettanti presenti in sospensione.

#### 2.4.2. *Inquinanti di origine non biologica*

##### **- Formaldeide**

Il rilascio di formaldeide da parte dei substrati (materiale da costruzione e rivestimento) è in funzione della temperatura e dell’umidità ambientali. Aumenti di umidità relativa dal 30% al 70% e della temperatura da 14°C a 35°C possono causare un raddoppio della concentrazione in aria di formaldeide.

##### **- Ozono**

La concentrazione di ozono indoor può essere ridotta da un incremento di umidità relativa grazie alla facilitazione delle reazioni di ossidazione; questa riduzione può essere però facilmente vanificata dall’immissione di aria esterna contaminata.

##### **- Ossidi di azoto e anidridi solforose**

Questi composti reagendo con l’umidità dell’aria formano aerosol acidi che possiedono una forte azione irritante sulle membrane mucose dell’occhio e dell’apparato respiratorio. Elevati livelli di umidità accrescono quindi gli effetti sull’organismo di questi composti, già di per sé notevolmente dannosi.

### **3. La percezione della qualità dell’aria in ambienti confinati**

L’odore percepito entrando in un certo ambiente o la possibilità di avvertire come viziata e soffocante l’aria interna influenzano in modo determinante la sensazione di trovarsi o meno a proprio agio in quell’ambiente.

Il rilascio di vari tipi di inquinanti e un ricambio d’aria insufficiente possono rendere invivibile un locale affollato: infatti la qualità dell’aria negli ambienti interni dipende principalmente dalla concentrazione degli inquinanti, cioè dalla quantità di inquinanti emessa in aria in rapporto al fattore di diluizione determinato dal ricambio con aria pulita.

La percezione olfattiva degli inquinanti può essere un efficace metodo per valutare con buona approssimazione il grado di comfort in un ambiente; ha però l’inconveniente di essere solo qualitativa e di non comprendere tutti gli inquinanti: alcuni infatti non sono praticamente percepibili ai nostri sensi, come il radon, in presenza del quale occorrono appositi strumenti di valutazione; altri sono invece percepibili più per la loro azione irritante o tossica che per il loro odore. Normalmente non si riesce a distinguere l’azione dei singoli inquinanti; ciò che si percepisce è solo un livello più o meno elevato di accettabilità che si traduce in una sensazione di più o meno elevato comfort respiratorio.

Gli esseri umani percepiscono la qualità dell’aria tramite due vie principali: il senso dell’olfatto (recettori olfattivi all’interno della cavità nasale), e recettori sensoriali sulle mucose delle prime vie respiratorie e dell’occhio sensibili alle azioni irritanti.

Inoltre la percezione olfattiva è un criterio assai soggettivo: le sensazioni provocate dai diversi inquinanti possono variare da persona a persona. Ne consegue che i livelli di accettabilità dell’aria ambientale sono difficili da quantificare.

Tuttavia, approfonditi studi hanno portato ad individuare una serie di regole che permettono di utilizzare la sensazione soggettiva di comfort per quantificare il livello di qualità dell’aria indoor. Tra i vari gruppi di lavoro coinvolti, uno in particolare, guidato dal danese Ole Fanger ha apportato innovazioni importanti in questo campo, soprattutto per il fatto di aver introdotto delle unità di misura: l’olf, dal latino *olfactus*, che rappresenta l’unità

di riferimento per il calcolo del carico inquinante percepibile, e il decipol (simbolo dp), dal latino *pollutio*, che quantifica invece la qualità percepibile dell’aria.

Elementi caratterizzanti la teoria di Fanger sono la possibilità di indicare in olf l’emissione di una qualsiasi fonte inquinante nell’ambiente e la correlazione tra il livello della qualità dell’aria in decipol e la percentuale delle persone insoddisfatte (PD) in un certo ambiente.

### 3.1. La teoria di Fanger

A fronte di molti aspetti innovativi, essa si è prestata ad alcune critiche riguardanti un’eccessiva tendenza alla semplificazione. Nonostante ciò, come metodo di dimensionamento del fabbisogno del ricambio d’aria in base alla qualità percepibile dell’aria stessa, si è dimostrata in molti casi uno strumento efficace e di facile impiego.

Per quantificare l’inquinamento degli ambienti interni serve una fonte di riferimento: l’uomo stesso è una fonte primaria di inquinanti, sia direttamente (bioeffluenti) che indirettamente (ad esempio fumo di tabacco).

#### *Definizione di olf:*

il carico inquinante dei bioeffluenti emanati da una persona che svolge un’attività sedentaria in condizioni di benessere termico è pari ad un olf; questa persona “standard” possiede attività metabolica di un met e un livello di igiene corrispondente a 0,7 docce al giorno.

Qualsiasi altra fonte di inquinamento percepibile è riportata all’olf, essendo quantificata come numero di olf necessari a evocare la stessa sensazione sensoriale di insoddisfazione. E’così possibile esprimere il carico inquinante percepibile globale di un ambiente (occupanti, arredamento e materiali da costruzione) semplicemente sommando gli olf corrispondenti a ogni inquinante.

#### *Definizione di decipol:*

una fonte inquinante pari a un olf, posta in un ambiente con una immissione di aria pulita pari a 10 l/s, determina un livello d’inquinamento percepito (giudizio qualitativo) pari a un decipol (dp).

Esiste una precisa relazione tra il livello d’inquinamento percepito in decipol e la percentuale di persone insoddisfatte al primo impatto con l’ambiente (PD, in %). Le percentuali pari al 10%, 20%, 30% di insoddisfatti identificano tre categorie di qualità dell’aria (denominate rispettivamente A, B e C) prese come riferimento per l’adeguato dimensionamento degli impianti di ventilazione.

CATEGORIA DI QUALITÀ	PERCENTUALE DI INSODDISFATTI	INQINAM. DECIPOL	RICAMBIO NECESSARIO L/(S*OLF)
A	10%	0,6	16
B	20%	1,4	7
C	30%	2,5	4

**Tabella 9.** Categorie di qualità percepita dell’aria.

I ricambi si intendono effettuati con aria esterna pulita, con  $\varepsilon_v = 1$  (vedere nel seguito).

---



Il carico inquinante totale che grava sull’ambiente può anche essere analizzato con metodi oggettivi, chimici e/o fisici, ed espresso quantitativamente come emissione dei singoli contaminanti da parte delle varie fonti. Parallelamente ad un’analisi quantitativa può essere condotta un’analisi qualitativa (in base alla percezione sensoriale) esprimendo il carico inquinante totale in olf.

Da un punto di vista *oggettivo*, l’apporto di inquinanti di una determinata fonte può essere quantificato in g/s o in g/(m<sup>2</sup>\*s) per ogni singola sostanza emessa. La somma delle quantità emesse dall’insieme delle fonti, relativamente a quella sostanza, costituisce il carico inquinante specifico totale.

Il carico inquinante *percepibile* è invece causato da quelle fonti che influiscono sul livello di accettabilità sensoriale dell’aria. Per stimare un totale, occorre conoscere anche il numero massimo di occupanti per metro quadrato dell’ambiente. La somma dei carichi dovuti agli occupanti e all’ambiente rappresenta il carico inquinante percepibile totale.

Negli ambienti interni dotati di impianto di ventilazione, ciò che conta è la qualità dell’aria nella zona occupata dalle persone (*breathing zone*). Una cattiva distribuzione dell’aria porterebbe infatti alla necessità di volumi di ricambio ben superiori per ottenere un risultato accettabile.

*Efficacia della ventilazione:*

secondo Fanger l’indice di efficacia della ventilazione in un ambiente ha espressione:

$$e_v = \frac{C_e - C_s}{C_i - C_s} \quad (1)$$

dove:

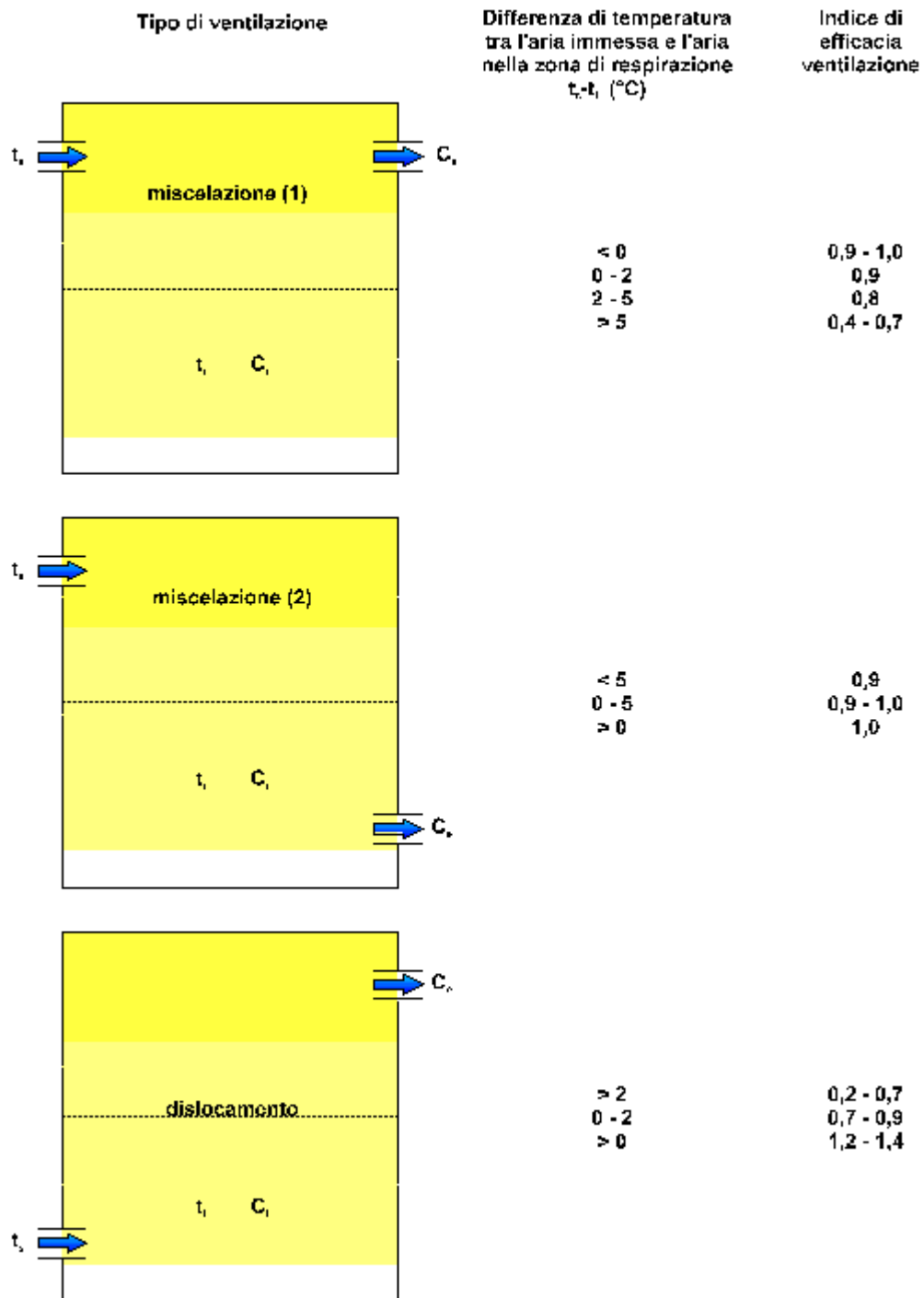
$\epsilon_v$  = efficacia della ventilazione

$C_e$  = concentrazione inquinante nell’aria in uscita

$C_s$  = concentrazione inquinante nell’aria in ingresso

$C_i$  = concentrazione inquinante nella zona di respirazione

In generale, il valore dell’efficacia di ventilazione sarà pari a 1 nel caso di perfetta miscelazione tra aria pulita e inquinante nell’ambiente considerato; il valore sarà maggiore di 1 se la concentrazione dell’inquinante è minore nella zona di respirazione rispetto all’aria in uscita, e in questo caso il livello di qualità desiderato si potrà ottenere con un flusso di ricambio abbastanza contenuto; il valore sarà minore di 1 se la concentrazione dell’inquinante è minore nell’aria in uscita rispetto alla zona di respirazione, nel qual caso ci vorrà un ricambio maggiore. Si veda anche la figura 1.



**Figura 1.** Efficacia di ventilazione nella zona di respirazione di ambienti ventilati in diversi modi.

*Determinazione della portata di aria esterna:*

il flusso di aria di ricambio può essere calcolato riferendosi sia alle esigenze di comfort (in base al carico inquinante percepito) sia in base alle esigenze di salute degli occupanti (utilizzando il carico inquinante misurato oggettivamente). Il valore più alto, che cioè rappresenta la condizione più restrittiva e che generalmente si riferisce a condizioni di comfort, sarà quello adottato dal progetto.

La portata d’aria necessaria a garantire il comfort (pedice “c” per *comfort*) ha espressione:

$$Q_c = 10 \frac{G_c}{C_{c,i} - C_{c,o}} \cdot \frac{1}{\varepsilon_v} \quad (2)$$

dove:

$Q_c$  = portata aria esterna di ricambio (l/s)  
 $G_c$  = carico inquinante percepibile totale (olf)  
 $C_{c,i}$  = qualità percepita dell’aria all’interno (decipol)  
 $C_{c,o}$  = qualità percepita dell’aria esterna di ricambio (decipol)  
 $\varepsilon_v$  = efficacia della ventilazione

La portata d’aria necessaria a garantire la tutela della salute (pedice “h” per *health*) ha espressione:

$$Q_h = \frac{G_h}{C_{h,i} - C_{h,o}} \cdot \frac{1}{\varepsilon_v} \quad (3)$$

dove:

$Q_h$  = portata d’aria esterna di ricambio (l/s)  
 $G_h$  = carico totale di un determinato inquinante (g/s)  
 $C_{h,i}$  = massima concentrazione ammessa di inquinante (g/l)  
 $C_{h,o}$  = concentrazione dell’inquinante nell’aria alla bocchetta di immissione (g/l)  
 $\varepsilon_v$  = efficacia della ventilazione

Queste equazioni sono applicabili in condizioni costanti e ipotizzando una sufficiente qualità dell’aria esterna.

Uno dei principali problemi nell’applicazione di questo metodo è la scelta arbitraria del tipo di inquinanti per il calcolo in funzione della tutela della salute. Indubbiamente il metodo può rappresentare un utile sistema per ottenere risultati garantiti dal punto di vista del comfort respiratorio: è però ancora troppo elevato il margine di arbitrio e indeterminazione per quanto riguarda la tutela della salute. D’altra parte, alcuni pericolosi inquinanti, come il CO, non sono direttamente percepibili dall’olfatto umano.

## **4. Controllo dell’inquinamento dell’aria in ambienti confinati**

### **4.1. Valutazione dell’inquinamento indoor e monitoraggio della qualità dell’aria interna**

I metodi di indagine impiegati per la valutazione dell’aria indoor derivano da quelli utilizzati nella valutazione degli ambienti industriali: le indagini possono essere programmate, per edifici nei quali sono stati segnalati problemi, oppure mirate allo sviluppo di metodi di controllo dei fattori che condizionano la qualità dell’aria interna.. Le modalità di svolgimento delle indagini in questione possono essere ricavate dalle indicazioni reperibili nelle linee guida elaborate da vari enti internazionali, quali: U.S. Building Air Quality, U.S. Niosh Guidance for Indoor Air Quality Investigation e IRSST Strategy for Studying Air Quality in Office Buildings.

L’approccio metodologico al problema è costituito da diverse fasi: dopo una raccolta dati relativa all’edificio e un sopralluogo, inizia la fase di monitoraggio vera e propria, a sua volta articolata su due livelli. Prima sono monitorati gli indicatori che consentono di valutare globalmente la qualità dell’aria; poi si effettuano misure di approfondimento di quanto emerso nella prima fase o di indagine su qualche problema specifico. Alla raccolta dati sull’edificio si può abbinare un’analisi di tipo ingegneristico finalizzata all’accertamento di carenze sia impiantistiche sia strutturali e di eventuali errori nelle procedure di gestione.

Le apparecchiature di rilevamento per inquinanti indoor devono avere ovviamente caratteristiche diverse rispetto a quelle impiegate per esterni: devono essere più piccole, meno rumorose e più sensibili, poiché le concentrazioni da rilevare sono più basse.

Le caratteristiche del monitoraggio, cioè che cosa si investiga, dove, per quanto tempo e con quale periodicità, sono determinate dal tipo di inquinanti presenti e di sorgenti individuate.

Gli obiettivi di un monitoraggio possono essere: valutare l’esposizione delle persone a determinati agenti inquinanti, individuare le sorgenti causa di disturbi accertati, verificare l’efficacia di eventuali interventi di contenimento e la rispondenza degli ambienti agli standard.

Esistono a tal proposito vari tipi di sensori, che qualitativamente possono ricondursi all’appartenenza a due categorie: i sensori di CO<sub>2</sub>, più complessi e costosi, che danno un’idea del livello della qualità dell’aria, e i sensori di gas misti che rilevano globalmente una quantità di composti, tra cui la frazione organica volatile e gli odori.

Il sistema di regolazione dell’impianto di climatizzazione, sulla base dei dati ricevuti dai sensori, provvede ad attuare le opportune correzioni sulle portate d’aria al fine di mantenere le condizioni ambiente impostate.

La localizzazione del campionamento dipende dal tipo di rilevamento che si vuole effettuare: postazioni fisse se si studiano gli ambienti nella loro globalità, campionatori mobili se si valuta l’esposizione individuale delle persone.

Gli inquinanti possono essere rilevati sia mediante strumentazione a lettura diretta (fiale colorimetriche), sia mediante campionamenti e successive analisi.

I metodi di campionamento variano a seconda del tipo di inquinante che si vuole analizzare: per i principali gas si usano celle elettrochimiche e campionamenti passivi per diffusione; per i composti organici, soprattutto la frazione volatile, si possono raccogliere campioni con palloni, o tramite filtrazione attiva o per diffusione passiva.

Gli inquinanti di tipo fisico, soprattutto particolato e fibre, vengono distinti in frazione inalabile e frazione respirabile (sotto i 10  $\mu\text{m}$  di diametro la prima e sotto i 2,5  $\mu\text{m}$  la seconda) per i diversi problemi che possono originare; il campionamento è effettuato comunque con filtrazione attiva su membrana.

Il fumo passivo si campiona con assorbimento su fiala e si analizza successivamente con tecniche gascromatografiche.

Gli inquinanti di tipo biologico si campionano su piastre, filtri o soluzioni, e, dopo un periodo di incubazione, si analizzano quantitativamente o qualitativamente con adatti procedimenti.

Anche in questo caso, la normativa italiana non prevede, a tutt’oggi, limiti specifici di riferimento cui attenersi nell’analisi dei risultati: per trovare indicazioni in questo senso si può fare riferimento ai principali standard internazionali in materia, come quelli canadesi, quelli dell’EPA e quelli dell’Organizzazione Mondiale della Sanità.

#### **4.2. Ventilazione e qualità dell’aria in ambienti confinati**

Nel capitolo precedente si è implicitamente introdotto uno dei metodi più utilizzati per il controllo dell’inquinamento indoor: la ventilazione, ovvero l’introduzione di aria esterna al fine di diluire gli inquinanti. Quando possibile, è però più conveniente ed efficace rimuovere il contaminante laddove si genera, ossia “ridurre le fonti di inquinamento piuttosto che aumentare la portata di ventilazione”. Vi sono in effetti una serie di questioni da tenere in attenta considerazione: innanzitutto il problema della qualità stessa dell’aria esterna che soprattutto nelle aree urbane non è certo ottimale, o quello relativo alla compatibilità di grandi portate d’aria con la legge sul risparmio energetico (i ventilatori utilizzano infatti energia pregiata prodotta inquinando l’ambiente). Purtroppo però, il controllo degli inquinanti alla fonte non è sempre attuabile: frequentemente si ricorre infatti alla seconda scelta di elezione, l’intervento sulla ventilazione.

Mentre molti pensano alla ventilazione solo come una circolazione d’aria internamente all’edificio, o come a una semplice immissione di aria esterna, la realtà è un po’ più complessa. In un impianto tipo si prende aria esterna, la si miscela all’aria ripresa dall’interno in proporzioni adeguate, quindi si filtra e si tratta termicamente la miscela ottenuta che viene quindi distribuita capillarmente nei vari ambienti. Una certa quota dell’aria interna viene direttamente scaricata all’esterno. La qualità dell’aria interna può essere seriamente compromessa dal malfunzionamento o dall’inadeguatezza di una o più di queste operazioni. Ad ogni modo, una corretta progettazione dell’impianto di trattamento aria, nonché una sua corretta conduzione e manutenzione, sono aspetti essenziali per ottenere una qualità dell’aria di livello soddisfacente.

Si è visto come i vari contaminanti in un ambiente chiuso non si presentino praticamente mai in concentrazioni uniformi: è quindi necessario un controllo spaziale di queste concentrazioni in modo tale da renderle minime nelle zone maggiormente occupate dalle persone, oltre che un controllo temporale quando il carico inquinante varia considerevolmente durante la giornata.

Da un punto di vista teorico si è soliti raggruppare i metodi di diffusione dell’aria in ambiente in due categorie:

- *perfect mixing distribution*: si immette in ambiente una certa portata d’aria, causando, in condizioni teoriche, una mescolanza dell’aria interna tale da distribuire in modo uniforme tutti i contaminanti. Le bocchette di mandata immettono l’aria a velocità nettamente

superiori a quelle che si rilevano nella *breathing zone*. I maggiori inconvenienti di questo tipo di metodo sono la possibilità di correnti d’aria e la probabile cortocircuitazione dell’aria tra immissione e estrazione.

- *perfect displacement distribution*: si realizza un fronte d’aria che avanza da un lato all’altro dell’ambiente e rimuove i contaminanti durante il suo moto. L’inconveniente più grosso è qui costituito dalla necessità di grandi quantità d’aria da introdurre che implica una velocità dell’aria considerevole nella *breathing zone*; è chiaro poi che la concentrazione degli inquinanti che si rileverà non sarà uniforme, ma crescente nel senso del moto.

Per una visualizzazione dei due metodi si rimanda alla figura 1.

#### 4.2.1. *Problemi relativi alla ventilazione e possibili soluzioni*

I processi coinvolti nella ventilazione portano fondamentalmente alla diluizione degli inquinanti. Infatti, generalmente, a un aumento dell’immissione di aria esterna corrisponde una diminuzione dei problemi di qualità dell’aria interna. Ciò nonostante, edifici con tassi di ricambio alti possono comunque scontare dei problemi dovuti alla cattiva distribuzione dell’aria o a una insufficiente evacuazione dell’aria viziata. Inoltre potrebbero esserci delle fonti di inquinanti così forti da causare alte concentrazioni anche con ventilazione abbondante; in questi casi è necessario pervenire all’aspirazione localizzata degli inquinanti con relativa espulsione diretta (ad esempio con l’impiego di cappe aspiranti).

Nel caso di impianti che funzionano in modo intermittente o ridotto in certi periodi della giornata in relazione ai soli fabbisogni termici si può verificare insufficiente ventilazione e difficoltà nella rimozione degli inquinanti. In realtà, devono essere stabiliti livelli minimi di ventilazione per ogni situazione, analogamente a come si fa per i valori ideali di temperatura e umidità. Soprattutto negli uffici è buona norma avviare l’impianto diverse ore prima dell’arrivo del personale e spegnerlo con altrettanto ritardo a fine giornata. Nei periodi di inattività è bene lasciare in funzione l’impianto con portata ridotta al minimo indispensabile.

Per quanto riguarda la distribuzione dell’aria, è fondamentale che le griglie di distribuzione non vengano mai occluse dagli occupanti per evitare flussi diretti di aria troppo fredda o troppo calda, altrimenti potrebbe conseguire una ventilazione insufficiente in tutto l’edificio e il pregiudicarsi di una buona circolazione generale dell’aria. Pertanto si rende necessario un controllo periodico dell’efficienza dei termostati e dello stato di apertura delle griglie di distribuzione.

Di grande importanza è poi il posizionamento delle griglie di presa e di scarico dell’aria all’esterno: si devono evitare situazioni di cortocircuito, anche parziale, tra l’aria viziata espulsa e l’aria fresca aspirata dall’esterno. La griglia di presa deve essere installata il più vicino possibile all’unità centrale di trattamento per evitare che l’aria non filtrata debba attraversare lunghi condotti ed il più lontano possibile da fonti esterne di inquinanti come scarichi di altri impianti, sede stradale, parcheggi, garages, depositi di rifiuti, ecc...

Si è detto che per diluire e rimuovere gli inquinanti occorre una quota d’aria esterna che deve essere anche trattata termicamente con una serie di costi aggiuntivi non trascurabili. Comunque limitare l’apporto di aria esterna al di sotto delle raccomandazioni rappresenta un risparmio illusorio poiché peseranno economicamente molto di più i problemi di qualità dell’aria che si avranno, anche dal punto di vista del rendimento sul lavoro degli occupanti, e i provvedimenti che si dovranno prendere per contrastarli. Un approccio più saggio al problema

prevede l’impiego di scambiatori termici a flusso incrociato che permettono di recuperare una buona parte del calore dell’aria espulsa per trattare l’aria in ingresso.

La manutenzione dell’impianto è fondamentale per mantenere un buon livello di qualità dell’aria. Se non perseguita l’impianto stesso può divenire la fonte più importante di inquinanti presenti nell’edificio. I dispositivi di umidificazione e deumidificazione devono essere tenuti puliti per prevenire la crescita di colonie batteriche e muffe. Infatti, una volta accumulatisi, i microrganismi possono facilmente essere veicolati nell’intero edificio, causando gravi rischi nel caso di specie patogene, come nel caso della *Legionella*.

#### 4.2.2. Ventilazione e normative

Per la determinazione in fase di progetto delle portate d’aria esterna necessarie nelle varie situazioni sono già stati presentati nel terzo capitolo due approcci *prestazionali*: quello basato sul controllo delle concentrazioni dei singoli inquinanti di particolare rilevanza, che devono mantenersi al di sotto di un valore massimo accettabile, e quello basato sul controllo della percezione olfattiva della qualità dell’aria, proposto da Fanger e tradotto nella proposta di normativa CEN prENV 1752.

Vi è poi un terzo tipo di approccio, quello *prescrittivo*, in cui si stabilisce la portata d’aria esterna per persona (o la portata d’aria riferita all’unità di superficie calpestabile del locale o un numero di ricambi orari) in base alla categoria dell’edificio e alla specifica funzione del locale. Di tale approccio si parla nella Norma UNI-CTI 10339, che costituisce il riferimento normativo più completo e aggiornato in Italia e che contiene prescrizioni sulle portate d’aria esterna e di estrazione, sulla filtrazione dell’aria e sul movimento dell’aria nelle zone occupate dalle persone.

Infatti, mentre a livello internazionale numerosi enti (tra cui l’Organizzazione Mondiale della Sanità, la Comunità Europea, la Nato ed altre associazioni sorte appositamente) si sono fatti promotori di iniziative per approfondire le tematiche della qualità dell’aria indoor, non si può dire che al momento esista in Italia una norma complessiva che regolamenti i livelli di inquinamento in ambienti confinati e la ventilazione sotto il profilo del benessere, dell’igiene ambientale, dell’efficienza energetica e della sicurezza. Vi sono solo alcune disposizioni particolari e settoriali, peraltro datate, spesso incomplete e inadeguate alla situazione attuale.

##### 4.2.2.1. La proposta di normativa CEN prENV 1752: approfondimento e considerazioni su alcuni aspetti

Indubbiamente, l’introduzione di una normativa appositamente ideata per migliorare gli standard di qualità dell’aria è di grande importanza. Ciò nonostante, i dati su cui è basata la procedura proposta contenuta nel documento prENV 1752 sono ancora troppo limitati e richiedono un’ulteriore attività di ricerca, specialmente per quanto riguarda l’individuazione del carico d’inquinamento, sia chimico che sensoriale, la determinazione della qualità dell’aria percepita e la loro relazione con le portate d’aria di ventilazione e i consumi energetici.

Le principali critiche avanzate dal CTI nell’esaminare la proposta di normativa riguardano il principio di sovrapposizione degli effetti di sorgenti diverse di inquinanti, che conduce ad una sovrastima delle portate d’aria, la procedura indicata per la determinazione dell’efficienza di ventilazione ed i dati sui carichi di inquinamento, che appaiono inadeguati.

Il progetto prENV 1752 prevede che in assenza di inquinanti pericolosi per la salute il tasso di ricambio dell’aria debba essere basato sulla *percezione olfattiva* delle persone,

espressa in decipol ed indicata con  $\zeta$ , che, come anticipato nel capitolo precedente, è legata tramite una relazione biunivoca alla percentuale di persone (PD) insoddisfatte della qualità dell’aria ambiente (vedere tabella 9). Scegliendo la percentuale massima  $PD_{lim}$  di persone insoddisfatte che si accetta siano nell’ambiente considerato, la percezione olfattiva ammessa ha espressione:

$$Z_{lim} = \frac{112}{[\ln(PD_{lim}) - 5,98]^4} \quad (4)$$

Quindi si analizzano le varie fonti inquinanti olfattive e, tramite tabelle, si determina il carico inquinante di ognuna. Il carico inquinante totale viene poi ipotizzato pari alla semplice somma:

$$G_{tot} = \sum_j G_j \quad (5)$$

In condizioni di regime stazionario e noti i valori indicativi per l’efficienza di ventilazione forniti dalla prENV 1752 si calcola così la portata d’aria esterna:

$$Q_c = 10 \frac{G_{tot}}{Z_{lim} - Z_o} \cdot \frac{1}{e_v} \quad (6)$$

dove  $\zeta_0$  è la percezione olfattiva dell’aria esterna.

Il metodo si presenta semplice, forse per certi aspetti semplicistico: in realtà, infatti, l’efficienza di ventilazione è tutt’altro che semplice da determinare, ma soprattutto non sono affatto provate le ipotesi di semplice additività (sovrapposizione degli effetti) dei carichi inquinanti parziali e di diretta proporzionalità tra  $G$  e  $\zeta$  (quindi tra  $\zeta$  e  $C$ ), a portata costante, su cui ci si basa.

Se tali ipotesi fossero provate, l’effetto olfattivo prodotto da due fonti dello stesso inquinante o di inquinanti diversi sarebbe uguale alla somma degli effetti prodotti separatamente dalle due fonti. Sperimentalmente, invece, si verifica che la sensazione nasale totale (odore e pungenza) è in genere ipoadditiva, come del resto induce a concludere la legge di Stevens, valida per tutti i fenomeni psicofisici, tra cui quindi la percezione olfattiva:

$$S = kC^n \quad (7)$$

dove:

$S$  è l’intensità dell’odore;

$C$  è la concentrazione dell’inquinante;

$k$  e  $n$  sono costanti ricavabili tramite appositi strumenti, con  $n < 1$ .

Tenuto conto di queste considerazioni, è possibile riconsiderare il problema delle emissioni gassose tramite un approccio che separi un meccanismo di tipo fisico, che determina la

---



concentrazione, da un meccanismo di tipo psicofisico, che determina la percezione dell’odore della sostanza:

**meccanismo fisico:** consiste nel determinare la concentrazione della sostanza nella zona occupata tramite la relazione (2) vista nel capitolo precedente, espressa opportunamente in funzione della concentrazione stessa e non della portata:

$$C_j = C_0 + \frac{q_j}{Qe_j} \quad (8)$$

dove:

$q_j$  è la portata di emissione di inquinante per il j-esimo inquinante gassoso;  
 $e_j$  è l’efficienza di ventilazione per il j-esimo inquinante gassoso.

Bisognerà quindi verificare che il valore della concentrazione di ogni inquinante sia inferiore a quello stabilito dalle norme igienico-sanitarie, indipendentemente dalla percettibilità olfattiva:

$$C_j < C_{j,\text{lim}} \quad (9)$$

**meccanismo psicofisico:** esiste una concentrazione di soglia al di sotto della quale non si ha percezione olfattiva e al di sopra della quale, come si è detto, l’intensità dell’odore è fornita dalla legge di Stevens:

$$S_j = k_j C_j^{n_j} \quad (10)$$

mentre l’odore risultante prodotto da diverse sostanze sarà dato da una funzione del tipo:

$$S = f(S_1, S_2, \dots, S_j, \dots, S_n) \quad (11)$$

con:

$$S < \sum_{j=1}^n S_j \quad (12)$$

a causa dell’ipoadditività.

Occorrerà verificare che:

$$S < S_{\text{lim}} \quad (13)$$

Determinata quindi una relazione tra sensazione complessiva prodotta e percentuale di insoddisfatti del tipo:

---

$$PD = g(S) \quad (14)$$

si confronterà infine PD con il suo valore limite  $PD_{lim}$ .

Un problema di questo tipo di approccio è che non si conosce un’espressione precisa quantitativamente per S. Si definiscono quindi un certo numero di categorie di cattivi odori, si ipotizza che all’interno delle varie categorie i tassi di emissione si possano sommare, una volta resi equivalenti e si definisce una funzione ad hoc che esprime l’effetto risultante dei vari cattivi odori.

Per esempio, nel caso di due categorie si può assumere valida una legge quadratica ipoadditiva di composizione del tipo:

$$S = (S_A^2 + S_B^2)^{0,5} \quad (15)$$

Nel seguito sono riassunte due diverse procedure di calcolo: una procedura di verifica per la simulazione dell’effetto olfattivo e una procedura di progetto per il dimensionamento della portata di ricambio.

#### *Verifica*

- Si determina la concentrazione dei vari inquinanti con la formula (8).
- Si verifica quindi il rispetto della concentrazione limite, formula (9).

Lo schema generale viene applicato alle due sostanze percepibili A e B:

- determinazione della concentrazione equivalente delle due sostanze:

$$C_A = C_{0,A} + \frac{q_A}{Qe_A} \quad (16a)$$

$$C_B = C_{0,B} + \frac{q_B}{Qe_B} \quad (16b)$$

- determinazione della percezione olfattiva prodotta da tali due sostanze separatamente:

$$S_A = k_A C_A^{n_A} \quad (17a)$$

$$S_B = k_B C_B^{n_B} \quad (17b)$$

- determinazione della percezione olfattiva complessiva:

$$S = (S_A^2 + S_B^2)^{0,5} \quad (18)$$

- determinazione della percentuale di insoddisfatti che ne consegue per l’effetto olfattivo totale:

$$PD = g(S) \quad (19)$$

### Progetto

Si identificano i requisiti accettabili di qualità dell’aria:

- definendo il massimo valore accettabile della percentuale degli insoddisfatti  $PD_{lim}$  (tabella 9);
- definendo la percezione olfattiva complessiva massima accettabile  $S_{lim}$ .

Dal valore di  $S_{lim}$  e dal rapporto:

$$r = \frac{e_B q_A}{e_A q_B} \quad (20)$$

utilizzando un apposito nomogramma si determina il valore massimo dell’aumento di concentrazione rispetto all’aria esterna delle due sostanze di riferimento:

$$\Delta C_A = C_A - C_{0,A} \quad (21a)$$

$$\Delta C_A = C_A - C_{0,A} \quad (21b)$$

Infine si calcola la portata d’aria di ricambio Q:

$$Q = \frac{q_A}{e_A \Delta C_A} = \frac{q_B}{e_B \Delta C_B} \quad (22)$$

#### 4.2.3. Depuratori d’aria

Possono rivestire un ruolo importante per migliorare la qualità dell’aria interna, anche se da soli non sono in grado di rimuovere tutti gli inquinanti presenti: è sempre e comunque indispensabile l’apporto d’aria esterna, anche se in molti casi la presenza di depuratori ne permette una riduzione notevole. Il posizionamento e la manutenzione dei depuratori sono da effettuare con attenzione: questi dispositivi sono infatti paragonabili a dei posacenere, da svuotare periodicamente, pena il rischio di divenire essi stessi fonte di inquinanti.

Esistono depuratori “on demand” che entrano in funzione automaticamente all’aumentare delle concentrazioni di inquinanti grazie alla presenza di appositi sensori. Spesso sono in grado di richiedere temporaneamente all’impianto di ventilazione una maggiore portata per far fronte all’aumento delle necessità di ricambio.

#### 4.2.4. Condizionatori d’aria

Esistono due tendenze contrastanti nella moderna progettazione dei sistemi di condizionamento: da un lato la richiesta di impianti con prestazioni sempre maggiori, dall’altro la richiesta di edifici sempre più sigillati e l’impiego di apparati che emettono inquinanti aggravando le condizioni ambientali.

In generale, gli impianti di climatizzazione devono contemporaneamente soddisfare esigenze di controllo dei parametri termoigrometrici dell’aria ambiente e di controllo della qualità dell’aria. Per quanto riguarda il comfort termoigrometrico si hanno dati definiti e ben noti su cui basare la progettazione, ma, come si è visto nel paragrafo relativo alle normative, non è così per la qualità dell’aria: qualitativamente si può dire che per i progettisti saranno possibili i tre approcci al problema (prescrittivo, prestazionale basato sul controllo delle concentrazioni dei singoli inquinanti e prestazionale basato sul controllo della percezione olfattiva della qualità dell’aria) presentati precedentemente.

L’impianto di condizionamento può essere fonte di inquinamento biologico per lo sviluppo di colonie batteriche in presenza di scarsa pulizia e manutenzione e può inoltre determinare aumento del deficit di ioni negativi per il funzionamento di apparecchiature elettriche: queste infatti formano particelle ionizzate positivamente che legandosi con gli ioni negativi presenti li annullano; ciò è deleterio dal momento che gli ioni negativi (in parte dovuti al ricambio dell’aria e all’irraggiamento solare) creano benessere favorendo l’assorbimento dell’ossigeno nel sangue. Tra i componenti degli impianti di condizionamento, i maggiori imputati di inquinamento biologico sono gli umidificatori perché in essi si realizzano le condizioni adatte alla proliferazione di alcuni batteri. L’acqua per gli umidificatori dovrebbe essere sottoposta solo a trattamento fisico; se non è possibile evitare il trattamento chimico è bene utilizzare sostanze di provata innocuità tossicologica e prive di qualunque effetto significativo sulla qualità percepita dell’aria. Per facilitare queste operazioni di pulizia, è preferibile che le varie parti dell’impianto siano facilmente accessibili e che i canali non siano coibentati internamente. Le coibentazioni interne creano infatti una serie di problemi, in quanto la sporcizia e le muffe non si limitano ad aderire alle superfici, dalle quali possono poi venire rimosse, ma penetrano all’interno degli strati isolanti dove non solo non sono più rimovibili, ma sono anche causa di degrado della coibentazione stessa.

In linea generale, il condizionamento, attuando il ricircolo di aria interna, comporta una ridotta diluizione degli inquinanti che non vengono trattiene dai sistemi di filtrazione, perché di basso peso molecolare e dei microrganismi; il fenomeno può peggiorare il livello di qualità dell’aria e conseguentemente far aumentare le manifestazioni di sintomi di SBS.

A tal proposito, si riporta nella tabella 10 un confronto tra sintomatologie manifestate in ambienti ventilati naturalmente e condizionati, ricavato da un manuale tecnico di condizionamento dell’aria negli edifici.

SINTOMI	VENTILAZIONE NATURALE	AMBIENTI CONDIZIONATI
Irritazione naso	5-19%	17-29%
Irritazione occhi	5-20%	17-34%
Irritazione mucose	8-30%	32-56%
Irritazione cute	2-6%	3-16%
Costrizione toracica	2-6%	7-14%
Febbre	2-4%	2-4%
Cefalea	13-40%	34-68%
Sonnolenza	13-50%	42-68%

**Tabella 10.** Confronto tra sintomatologie manifestate in ambienti ventilati naturalmente e in ambienti condizionati.

## Riferimenti bibliografici

### Testi:

G. Moncada Lo Giudice, M. Coppi, *Benessere termico e qualità dell’aria interna*, Ed. Masson (1997).

M. Maroni, *Salute e qualità dell’aria negli edifici*, Ed. Masson (1998).

S. Barbuti, E. Bellelli, G.M. Fara, G. Giammanco, *Igiene e medicina preventiva*, Ed. Monduzzi.

### Riviste:

*CDA - Condizionamento dell’aria, riscaldamento, refrigerazione* (organo ufficiale A.I.C.A.R.R.)

n. 1 – gennaio 1994, pag. 49

“Efficacia di ventilazione nella zona di respirazione di ambienti ventilati in diversi modi”

n. 1 – gennaio 1995, pag. 40

G. Clausen, L. Carrick, P.O. Fanger, S.W. Kim, T. Poulsen, J.H. Rindel

“Studio comparato sul discomfort per inquinamento dell’aria interna, condizioni termiche e rumore”

n. 12 – dicembre 1995, pag. 1256

L. De Santoli, G. Fasano, G. Giorgiantoni, G. Fracastoro, C. Joppolo, M. Masoero, G. Rossi

“Normativa europea sulla ventilazione degli edifici – Considerazioni e proposte in merito”

n. 11 – novembre 1996, pag. 1275

A cura della redazione

“Avvenimenti – La qualità dell’aria indoor – Milano, 24 Maggio 1996”

### Internet:

R. Bono, *L’inquinamento dell’aria negli ambienti confinati: gli effetti sulla salute dell’uomo*

URL: <http://www.reteambiente.it/architettura/architettura.htm>

C. Vergani, *La percezione della qualità dell’aria negli ambienti interni*

C. Vergani, *La Sindrome dell’Edificio Malato*

C. Vergani, *Umidità relativa ed inquinanti indoor*

C. Vergani, *Ventilazione e qualità dell’aria negli uffici*

URL: <http://www.geocities.com/RainForest/9884/artic.htm>