

LA VALUTAZIONE DELLA QUALITÀ DELL'ARIA NEI LUOGHI DI LAVORO

INAIL

Benessere, performance

2023

COLLANA **SALUTE E SICUREZZA**



LA VALUTAZIONE DELLA QUALITÀ DELL'ARIA NEI LUOGHI DI LAVORO

INAIL

Benessere, performance

2023

Pubblicazione realizzata da

Inail

Direzione regionale Campania

Responsabile scientifico

Michele del Gaudio¹

Autori

Michele del Gaudio¹, Daniela Freda², Pasquale Avino³, Paolo Lenzuni⁴

Comunicazione

Angela Nicotera⁵

¹ Inail, Direzione regionale Campania, Unità Operativa Territoriale di Avellino

² Inail, Dipartimento di Innovazioni Tecnologiche e Sicurezza degli Impianti, Prodotti e Insediamenti Antropici

³ Università degli Studi del Molise, Dipartimento Agricoltura, Ambiente e Alimenti

⁴ Inail, Direzione regionale Toscana, Unità Operativa Territoriale di Firenze

⁵ Inail, Direzione regionale Campania

per informazioni

Inail - Direzione regionale Campania

Unità Operativa Territoriale Certificazione Verifica e Ricerca di Avellino

via Ferdinando Iannaccone 14/16, 83100 Avellino

avellino-uotcvr@inail.it

www.inail.it

© 2023 Inail

isbn 978-88-7484-823-2

Gli autori hanno la piena responsabilità delle opinioni espresse nelle pubblicazioni, che non vanno intese come posizioni ufficiali dell'Inail.

Distribuita gratuitamente. Vietata la vendita e la riproduzione con qualsiasi mezzo. È consentita solo la citazione con l'indicazione della fonte.

Indice

Presentazione	5
Premessa	7
1 La qualità dell'aria indoor - Normativa e legislazione	9
1.1 La normativa tecnica internazionale	9
1.2 La legislazione dei paesi europei	10
1.3 La legislazione italiana	12
2 I concetti chiave: rischio, comfort, metodo prescrittivo e prestazionale	14
2.1 Rischio e discomfort	14
2.2 Il giudizio degli occupanti	15
2.3 Perché il metodo diretto/prestazionale è preferibile al metodo indiretto/prescrittivo	16
2.3.1 Aria salubre e quantità sufficiente	16
2.3.2 Metodo indiretto (prescrittivo)	16
2.3.3 Metodo diretto (prestazionale)	17
3 Criterio di classificazione	19
4 Sostanze di origine antropica	23
4.1 Descrittori	23
4.1.1 Sostanze emesse per traspirazione/sudorazione	23
4.1.2 Sostanze emesse per respirazione	23
4.2 Soglie di accettabilità	24
4.3 Percentuale di insoddisfatti associata alla concentrazione di CO ₂	25
5 Sostanze generate dai materiali edilizi/di arredo e dalle lavorazioni	27
5.1 Descrittori	27
5.1.1 Sostanze emesse dai materiali edilizi e di arredo	27
5.1.2 Sostanze emesse dalle lavorazioni eseguite	27
5.2 Soglie di accettabilità	28
5.2.1 Tempi di media	28
5.2.2 Soglie di accettabilità e valori limite	29
5.2.3 Formaldeide (HCHO)	29
5.2.4 Composti organici volatili totali (TVOC)	30
5.2.5 Sintesi	31
6 Sostanze inquinanti presenti nell'aria esterna	32
6.1 Individuazione degli inquinanti gassosi rilevanti per la qualità dell'aria	32
6.2 Soglie di accettabilità degli inquinanti gassosi	33
6.2.1 Biossido di Azoto	34
6.2.2 Biossido di Zolfo	34

6.2.3	Monossido di Carbonio	34
6.2.4	Ozono	35
6.2.5	Sintesi	35
6.3	Descrittori e soglie di accettabilità degli inquinanti particellari	35
6.3.1	PM _{2,5} e PM ₁₀	35
6.3.2	Sintesi	36
7	Misure	37
7.1	Quantità oggetto della misura	37
7.2	Collocazione temporale delle misure	37
7.3	Numero e collocazione spaziale delle postazioni di misura	38
7.4	Numero di misure in ciascuna postazione	39
7.5	Durata della misura	39
7.6	Sintesi e sequenza operativa	40
8	Miglioramento della qualità dell'aria	41
8.1	Introduzione	41
8.2	Inquinanti di origine antropica	41
8.2.1	Aspetti generali	41
8.2.2	Riduzione della densità di soggetti	42
8.2.3	Cambiamento della destinazione d'uso	42
8.3	Inquinanti di origine non antropica	44
9	Strumenti e principi di funzionamento	46
9.1	Concentrazione di CO ₂	46
9.2	Concentrazione di inquinanti emessi da materiali edilizi e di arredo	46
9.3	Concentrazione di inquinanti di origine outdoor	47
9.3.1	Monossido e Biossido di azoto	47
9.3.2	Biossido di zolfo	47
9.3.3	Monossido di carbonio	48
9.3.4	Ozono	49
9.3.5	PM _{2,5} e PM ₁₀	49
Bibliografia		50
	Riferimenti legislativi	50
	Riferimenti normativi	51
	Riferimenti scientifici	53
	Documenti redatti da istituzioni internazionali	57
Appendice A – IAQ e performance		59
Appendice B – Verifica del rispetto di un limite sulla portata d'aria mediante misure di CO₂		63

Presentazione

La qualità dell'aria in un luogo di lavoro rappresenta spesso uno degli elementi cardine in grado di assicurare o al contrario compromettere il benessere di chi vi opera. Inoltre, se non adeguatamente controllata, essa può determinare condizioni che possono interferire con la normale attività con conseguenti impatti sulla produttività. Quest'ultimo aspetto si manifesta sia sotto forma di un maggior numero di errori compiuti nello svolgimento di una determinata attività, sia sotto forma di una minor velocità, e di conseguenza un maggior tempo richiesto, nell'esecuzione del compito.

La valutazione della qualità dell'aria negli ambienti di lavoro è resa complessa dalla simultanea presenza nell'aria di tali ambienti di molte sostanze di origine diversa, sia prodotte dal normale processo di respirazione antropica, sia emesse dai materiali ivi presenti, sia introdotte dall'esterno.

Benché il d.lgs. 81/2008 fornisca indicazioni riguardo alla qualità dell'aria nell'Allegato IV "Luoghi di lavoro", l'assenza di elementi quantitativi implica che qualsiasi valutazione in merito va realizzata facendo riferimento alla normativa tecnica. Tuttavia, al contrario di ciò che avviene in altri ambiti dell'igiene occupazionale, la normativa, sia nazionale che internazionale, non fornisce un quadro univoco e facilmente applicabile nelle molteplici realtà dei luoghi di lavoro. La Direzione Regionale Inail della Campania, avvalendosi degli esperti del settore Certificazione, Verifica e Ricerca, della Direzione Ricerca-DIT e dell'Università del Molise, ha voluto realizzare questo quaderno per fornire ai datori di lavoro, ai responsabili dei servizi di prevenzione e protezione e a tutti coloro che si occupano di prevenzione, un momento di sintesi sulle attuali conoscenze e permettere loro di valutare nel migliore dei modi l'accettabilità della qualità dell'aria presente nei luoghi di lavoro, mettendoli così in grado di realizzare, se necessario, le migliori azioni correttive.

Il Direttore Regionale Inail Campania
Daniele Leone

Premessa

Questo documento affronta il tema della qualità dell'aria indoor (IAQ) nei luoghi di lavoro. Questo aspetto è da tenere sotto controllo perché contribuisce, al pari di altri fattori (microclima, rumore, luminosità ecc.), a rendere il luogo di lavoro confortevole per i lavoratori. Il datore di lavoro può agire con azioni di bonifica selezionando i materiali da costruzione, gli arredi o favorendo il ricambio dell'aria con sistemi anche meccanici, ma poco può fare per modificare l'inquinamento proveniente dall'esterno che quindi non è argomento di questo documento. Su questo tema si è detto e si è scritto moltissimo, e la sovrapposizione di disposizioni di legge e normative tecniche ha finito col creare, non sorprendentemente, un quadro assai intricato.

Uno degli aspetti che creano più confusione è la storica e sgradevole convivenza di due approcci sia concettualmente sia praticamente molto distanti: il primo valuta la qualità dell'aria mediante la portata d'aria immessa nell'ambiente, mentre il secondo utilizza per lo stesso scopo la concentrazione di alcune sostanze inquinanti.

L'approccio che si basa sulle portate d'aria da immettere nell'ambiente (altresi detto prescrittivo) ha una lunga storia alle spalle e negli anni si è affermato come il metodo di riferimento. Questo è con tutta probabilità dovuto al fatto che la grande maggioranza delle leggi e delle normative tecniche che disciplinano questo tema sono relative alla **progettazione** di impianti RCV (Riscaldamento Condizionamento Ventilazione), una fase in cui è ragionevole percorrere questa via.

Se invece la fase di interesse è quella della **valutazione** della qualità dell'aria, le cose cambiano radicalmente, e l'approccio basato sulla misura delle concentrazioni di diversi inquinanti (altresi detto prestazionale) risulta non solo più coerente con i metodi utilizzati per la valutazione degli altri aspetti del comfort, ma anche concettualmente più diretto e praticamente più semplice. E' per questo motivo che questo quaderno si concentra esclusivamente su questo approccio.

Come il precedente quaderno Inail "La Valutazione del Microclima" (Inail, 2018), il presente quaderno si focalizza sugli aspetti metrologici e di valutazione. A differenza del precedente, esso si limita al possibile impatto sul comfort e sulla performance dei soggetti esposti, ma al contempo contiene un esame critico dei miglioramenti che è possibile ottenere applicando diversi elementi correttivi.

1. La qualità dell'aria indoor - Normativa e legislazione

1.1 La normativa tecnica internazionale

La letteratura scientifica contiene un'ampia documentazione in termini di articoli, interventi a convegno, recensioni, libri e capitoli di libro, editoriali, lettere, articoli pubblici sugli effetti dovuti alla presenza di contaminanti chimici negli ambienti indoor. Una ricerca nel database della letteratura Scopus utilizzando la parola chiave "Indoor Air Quality" (IAQ), ha portato a identificare un totale di 5429 pubblicazioni tra il 2000 e il 2020 nel territorio UE allargato a Norvegia, Svizzera e Turchia. Secondo questa ricerca, l'Italia (811 articoli) è la nazione più attiva in questo settore, seguita da Francia e Germania (696 e 605 articoli, rispettivamente). Questa continua e crescente attenzione alla qualità dell'aria indoor ha portato nel tempo alla necessità di un profondo cambiamento culturale per poter efficacemente attaccare il problema della valutazione di questo elemento in ambienti di lavoro diversi da quelli tipici delle produzioni industriali (ad esempio, uffici, scuole, ospedali, banche, uffici postali ecc.).

L'idea iniziale è stata quella di utilizzare i valori limite di esposizione professionale (VLEP) presenti nella legislazione o i valori limite di soglia (TLV) dell'American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH) o dello Scientific Committee For Occupational Exposure Limits (SCOEL) ridotti di 1/10 o 1/100. Tuttavia, già agli inizi degli anni '80 la World Health Organization (nel seguito identificata come WHO) nel proprio documento *Indoor air pollutants exposure and health effects* (WHO 1982), sottolineava come fosse errato utilizzare i valori limite di esposizione professionale industriale per gli ambienti indoor non industriali e che per tali ambienti fosse necessario lo sviluppo di specifici riferimenti. Questa indicazione è stata successivamente confermata in lavori specifici elaborati da diversi gruppi di lavoro nazionali ed europei sulla tematica indoor (Fabianova et. 2001; Olesen 2004, 2012; Settimo e D'Alessandro 2014; Kunkel et al 2015; Settimo et al 2020a).

Negli anni successivi il WHO ha poi sviluppato e messo a punto linee guida per la qualità dell'aria indoor, relative a un certo numero di inquinanti per i quali le conoscenze scientifiche relative agli effetti sull'uomo sono state giudicate sufficientemente robuste. Le sostanze considerate sono: benzene, biossido di azoto, idrocarburi policiclici aromatici (soprattutto benzo[a]pirene), naftalene, monossido di carbonio, radon, tricloroetilene, tetracloroetilene.

In campo normativo, un documento particolarmente autorevole risulta essere lo standard ISO 16000 il quale, nelle sue diverse parti, descrive le procedure con cui effettuare le attività di campionamento e le analisi dei principali inquinanti negli ambienti indoor (UNI EN ISO 16000-9:2006). Il pregio maggiore di questi documenti risulta essere la standardizzazione dei metodi, la quale aumenta la possibilità di

una corretta comparazione tra i diversi dati sulla qualità dell'aria indoor prodotti in diversi contesti. Va tuttavia sottolineato che questi standard si focalizzano su metodi di laboratorio, difficilmente utilizzabili per il monitoraggio della qualità dell'aria sul quale si focalizza il presente quaderno. Inoltre, lo standard ISO 16000 non si occupa di definire valori limite di accettabilità.

Sulla stessa linea si è mosso in Italia il Gruppo di Studio Nazionale *Inquinamento Indoor*, istituito nel 2010 presso l'Istituto Superiore di Sanità (GdS-ISS), che ha elaborato diversi documenti di riferimento per le strategie di monitoraggio dei principali inquinanti indoor chimici e biologici. Le principali risultanze di tali lavori sono state riportate nella serie Rapporti ISTISAN, disponibile on line nel sito ufficiale ISS dedicato al GdS Inquinamento Indoor (Fuselli et al 2013a,b; Bonadonna et al 2013; Musmeci et al 2015; Nuccetelli et al 2017; Santarsiero et al 2015a,b; Settimo et al 2016a,b,2019,2020b).

1.2 La legislazione dei paesi europei

In ambito UE, anche se si sono moltiplicate negli anni le iniziative pre-legislative, ad oggi manca ancora una politica integrata in materia di qualità dell'aria indoor in tutti quei luoghi di lavoro (es. scuole, uffici, banche, ospedali, abitazioni, ecc.) di natura non industriale. In assenza di una direttiva specifica di riferimento sulla qualità dell'aria indoor, va segnalata la risoluzione del 13 marzo 2019, che sollecita gli stati membri a adottare e attuare misure per combattere l'inquinamento atmosferico alla fonte. In coerenza con tale sollecitazione alcuni Paesi europei, in particolare Germania, Regno Unito, Francia, Paesi Bassi, Finlandia, Austria, Belgio, Portogallo, si sono negli anni dotati di specifici valori guida, valori di riferimento e valori di azione per la qualità dell'aria negli ambienti indoor, in alcuni casi recepiti sotto forma di atti legislativi.

Nello specifico:

- la Germania ha attivato il Working Group on Indoor Guideline Values of the Federal Environmental Agency and the States Health (AG IRK/AOLG, 1993), che ha utilizzato una metodologia a partire dal LOAEL – Lowest Observed Adverse Effect Level, ovvero livello più basso di esposizione ad una sostanza tossica, per il quale sono stati osservati effetti negativi per la salute, introducendo dei fattori di sicurezza (quali ad esempio differenze inter ed intraspecie e di esposizione);
- diverso invece appare l'orientamento della Gran Bretagna, che con la Commissione sugli effetti per la salute umana dell'inquinamento atmosferico - Committee On The Medical Effects of Air Pollutants (COMEAP) (Public Health England 2019), aggiornato nel 2020, ha elaborato valori guida sulla base degli studi OMS.;
- lo stesso ha fatto la Francia, grazie alla collaborazione tra il French Scientific and Technical Centre for Construction (CSTB) e il French Agency for Environmental and Occupational Health Safety (AFSSET) (ANSS 2011; Décret France 2011a,b); il gruppo di lavoro ha elaborato una lunga serie di studi per arrivare come

risultato alla elaborazione di valori guida per 8 sostanze quali acido cianidrico, monossido di carbonio, benzene, formaldeide, tricloroetilene, tetracloroetilene, naftalene, PM₁₀ e PM_{2.5}. Inoltre, sono importanti le indicazioni date dall'Alto Consiglio di Sanità Pubblica - Haut Conseil de la Santé publique (HCSP) - che ha elaborato una serie di documenti sui valori di azione e di lungo periodo per la valutazione della qualità dell'aria indoor (HCSP 2009);

- anche l'Olanda, con i lavori del National Institute for Public Health and the Environment (RIVM 2004, 2007), ha ottenuto dei valori guida a partire dal MPR - Maximum Permissible Risk - che rappresenta il livello di esposizione ad una sostanza tossica per il quale non si hanno effetti negativi sulla salute;
- la Finlandia, con il gruppo di lavoro coordinato dal Ministero degli Affari Sociali e della Sanità (MSAH), ha elaborato valori guida per 5 sostanze quali ammoniacca, monossido di carbonio, anidride carbonica, idrogeno solforato e PM₁₀ (Ahola et al 2019), entrati in vigore già dal 1° ottobre 2003. Mentre per gli altri inquinanti è possibile ricavare valori guida utilizzando come approccio quello di un 1/10 dei limiti per gli ambienti di lavoro industriali (OEL). Accanto a questi riferimenti sono presenti quelli elaborati dalla Finnish Society of Indoor Air Quality and Climate Classification (Ahola et al 2019), che ha portato alla individuazione dei valori obiettivo definiti come classe S1, S2 e S3;
- il Belgio, ed in particolare nella Regione Fiamminga, ha fissato con decreto entrato in vigore il 1° ottobre 2004, dei valori di riferimento per 15 sostanze, quali acetaldeide, formaldeide, aldeidi totali, benzene, asbesto, anidride carbonica, biossido di azoto, toluene, ozono, monossido di carbonio, composti organici volatili, tricloroetilene, tetracloroetilene, PM₁₀ e PM_{2.5}) (Hoge Gezondheidsraad 2017);
- in Austria alla fine degli anni 90, il Ministero dell'Ambiente in collaborazione con l'Accademia delle Scienze, istituiva un gruppo di lavoro interdisciplinare per la stesura di valori guida per gli ambienti indoor, utilizzando una metodologia a partire dal NOAEL - No-Observed-Adverse-Effect-Level - ovvero dose senza effetto avverso osservabile per un'esposizione ad una sostanza tossica (BMLFUW 2006). Con questo approccio sono stati sviluppati valori guida per 6 sostanze, quali formaldeide, stirene, toluene, anidride carbonica, composti organici volatili e tricloroetilene;
- anche il Portogallo, nell'aprile del 2006, con il decreto n. 79, del Ministero dei Lavori Pubblici, dei Trasporti e delle Comunicazioni (Ministério Das Obras Públicas 2006), ha fissato delle concentrazioni massime di riferimento per 6 sostanze quali PM₁₀, anidride carbonica, monossido di carbonio, ozono, formaldeide, composti organici volatili totali. Il decreto, in vigore dal giugno del 2006, inoltre istituisce l'obbligatorietà del monitoraggio legato al tipo e alle dimensioni dell'edificio, e prevede azioni correttive entro 30 giorni.

Per tutti questi Paesi ad eccezione di Belgio, Finlandia, Portogallo e Francia (per benzene, formaldeide e biossido di carbonio), i valori guida raccomandati non hanno valore legale, anche se nella pratica hanno raggiunto una notevole importanza.

1.3 La legislazione italiana

All'interno del d.lgs. 81/2008 il tema della qualità dell'aria viene affrontato al punto 1.9.1 dell'allegato IV "Luoghi di lavoro" nel quale viene richiesta la conformità dell'ambiente lavorativo ad una serie di requisiti, tutti peraltro qualitativi. L'allegato IV rappresenta l'elemento di dettaglio a supporto del più generale art. 63 (Requisiti di salute e sicurezza).

1.9.1. Aerazione dei luoghi di lavoro chiusi

1.9.1.1. *Nei luoghi di lavoro chiusi, è necessario far sì che tenendo conto dei metodi di lavoro e degli sforzi fisici ai quali sono sottoposti i lavoratori, essi dispongano di aria salubre in quantità sufficiente anche ottenuta con impianti di areazione.*

1.9.1.2. *Se viene utilizzato un impianto di aerazione, esso deve essere sempre mantenuto funzionante. Ogni eventuale guasto deve essere segnalato da un sistema di controllo, quando ciò è necessario per salvaguardare la salute dei lavoratori.*

1.9.1.3. *Se sono utilizzati impianti di condizionamento dell'aria o di ventilazione meccanica, essi devono funzionare in modo che i lavoratori non siano esposti a correnti d'aria fastidiosa.*

1.9.1.4. *Gli stessi impianti devono essere periodicamente sottoposti a controlli, manutenzione, pulizia e sanificazione per la tutela della salute dei lavoratori.*

1.9.1.5. *Qualsiasi sedimento o sporcizia che potrebbe comportare un pericolo immediato per la salute dei lavoratori dovuto all'inquinamento dell'aria respirata deve essere eliminato rapidamente.*

Come ogni agente di discomfort, e quindi interferente con l'attività lavorativa, la qualità dell'aria va opportunamente valutata ed inserita all'interno del Documento di Valutazione dei Rischi per la salute e sicurezza (DVR), previsto dall'art. 28 del d.lgs. 81/2008.

Nella valutazione della qualità dell'aria vanno indicati i seguenti elementi:

- A. data certa di esecuzione della valutazione, con eventuali misurazioni;
- B. dati identificativi del *personale qualificato*¹ che ha provveduto alla valutazione;

¹ Si definisce *personale qualificato* un operatore in possesso di esperienza specifica nel settore o di conoscenze specifiche acquisite, ad esempio, attraverso la partecipazione a specifici corsi di formazione; in assenza di ulteriori specifiche è possibile valutare l'operato del valutatore in base alla qualità dell'elaborato prodotto e in base all'aderenza alle normative cogenti e di buona tecnica.

- C. dati identificativi del RLS o, ove assente, dei lavoratori, consultati ai sensi dell'art. 50, comma 1, e delle modalità della relativa consultazione e informazione;
- D. dati identificativi della *relazione tecnica* allegata (es.: data, estremi del protocollo, numero di pagine, ecc.), la quale deve contenere, almeno:
 - tipologia di impianto (se presente), tempi e modalità di manutenzione;
 - l'elenco dei punti di ingresso/uscita dell'aria nell'ambiente analizzato;
 - il quadro di sintesi dei soggetti esposti;
 - i risultati delle misure eseguite;
 - la/le categorie assegnate ai diversi soggetti esposti;
 - le pertinenti soglie di accettabilità;
 - la valutazione del comfort dei soggetti esposti;
- E. il programma delle misure tecniche e organizzative che si adotteranno per eliminare, o ridurre, l'eventuale discomfort individuato, con l'indicazione della tempistica, delle modalità e delle figure aziendali preposte alla loro attuazione.

Si sottolinea il fatto che la *relazione tecnica* (punto D) va sempre conservata in azienda in vista della programmazione e dell'attuazione delle misure di prevenzione e protezione e, ovviamente, a disposizione degli organi di vigilanza.

2. I concetti chiave: rischio, comfort, metodo prescrittivo e prestazionale

La qualità dell'aria interna è considerata accettabile quando in essa non sono presenti inquinanti in concentrazioni dannose, secondo quanto stabilito dalle autorità competenti, e quando una larga maggioranza delle persone esposte (80% o più) non esprime insoddisfazione verso di essa (ANSI/ASHRAE 62.1).

I due elementi cardine di questa definizione sono: 1) l'eventuale presenza di sostanze inquinanti in concentrazioni sufficientemente elevate da risultare dannose; 2) il giudizio espresso dagli individui riguardo all'agente di discomfort (la qualità dell'aria). Nei primi due punti di questo capitolo verranno trattati in dettaglio queste due questioni.

2.1 Rischio e discomfort

Esistono quattro tipologie di sostanze inquinanti in ambienti indoor:

- a) le sostanze generate dagli occupanti;
- b) le sostanze generate dai materiali edilizi e di arredo;
- c) le sostanze generate dalle lavorazioni eseguite;
- d) le sostanze presenti nell'aria esterna (particolato e gas/vapori), immesse all'interno dalla ventilazione naturale o meccanica.

Quando le concentrazioni di una o più di tali sostanze sono tali da risultare dannose/pericolose, il datore di lavoro è tenuto alla valutazione del rischio per la salute per esposizioni a sostanze pericolose (d.lgs. 81/2008 Titolo IX). In questo caso si ha a che fare con un possibile rischio per la salute e non con un possibile discomfort. Pertanto, questo caso non verrà considerato in questo quaderno.

Parimenti non è considerata l'esposizione al fumo, che è di fatto vietata nei luoghi di lavoro chiusi ai sensi dell'art. 51 "Tutela della salute dei non fumatori" della legge 3/2003.

Nel caso contrario, in cui nessuna delle sostanze sopra elencate è presente in concentrazioni tali da risultare dannosa/pericolosa, la valutazione da effettuare è relativa all'entità dell'eventuale disturbo arrecato dalla qualità dell'aria indoor (IAQ). Questo elemento potenzialmente concorre, assieme ad altri elementi quali l'ambiente termico, acustico e luminoso, ad impedire che gli individui presenti avvertano quella generale sensazione di soddisfazione per l'ambiente, comunemente definita "benessere" o "comfort". Di questo caso si occupa il presente quaderno.

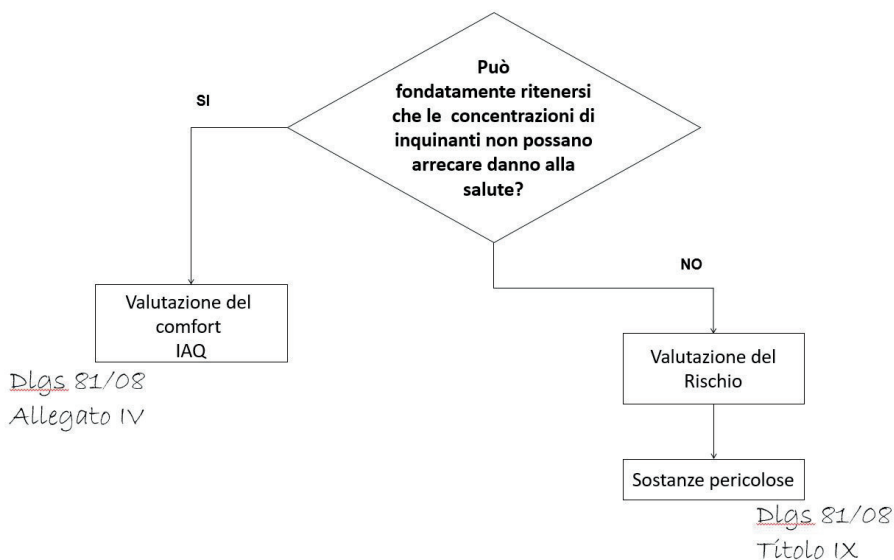


Figura 2.1 - Discriminazione radicale fra ambienti con/senza concentrazioni di inquinanti tali da poter rappresentare un possibile rischio per la salute

La figura 2.1 mostra graficamente il bivio che esiste alla radice di qualsiasi valutazione di inquinamento indoor.

2.2 Il giudizio degli occupanti

Una volta chiarito che le sostanze presenti nell'ambiente non determinano rischi per la salute, il passo successivo è capire su quali basi stabilire l'accettabilità dell'ambiente. Secondo la definizione dello standard ANSI/ASHRAE 62-1 presentata all'inizio di questo capitolo, tale accettabilità risulta legata ad un giudizio positivo espresso da una forte maggioranza dei soggetti. Come per l'ambiente termico, così anche per l'IAQ sono stati cercati descrittori di natura chimico/fisica collegati al giudizio soggettivo, che consentano una valutazione oggettiva dell'ambiente. Si sono in tal modo generati due percorsi:

- il primo, concettualmente diretto, detto anche prestazionale, prevede che l'accettabilità risulti associata al mantenimento al di sotto di opportune soglie limite le concentrazioni delle sostanze inquinanti citate all'inizio del punto 2.1;
- il secondo, di tipo indiretto, detto anche prescrittivo, prevede che l'accettabilità risulti associata al mantenimento di flussi in ingresso di aria pulita, di entità pari o superiore ad opportuni valori limite.

In questo quaderno viene sviluppato esclusivamente il metodo diretto. Nel successivo punto 2.3 vengono chiariti i motivi per i quali il metodo diretto risulta,

a nostro giudizio, largamente preferibile al metodo indiretto, giustificando in tal modo la scelta compiuta.

2.3 Perché il metodo diretto/prestazionale è preferibile al metodo indiretto/prescrittivo

2.3.1 Aria salubre e quantità sufficiente

Il punto 1.9.1.1 dell'allegato IV del d.lgs. 81/2008, con una formulazione piuttosto generica che risale addirittura al D.P.R. 303 del 19 marzo 1956, pone come condizione per l'accettabilità della qualità dell'aria in un ambiente di lavoro, che "... i lavoratori dispongano di aria salubre in quantità sufficiente ...". La legge contiene dunque due elementi chiave "aria salubre" e "quantità sufficiente". Purtroppo, da sempre, l'enfasi è stata posta sul secondo concetto, quello di quantità sufficiente. Ciò è con tutta probabilità dovuto al fatto che in fase di progetto è molto comodo ragionare in termini di portata d'aria immessa, che può facilmente essere legata alle prestazioni dell'impianto di ventilazione. Vanno tuttavia sottolineati due aspetti: a) la legge non parla di quantità sufficiente di aria immessa, bensì di disponibilità di aria (salubre) in quantità sufficiente, e sono due concetti diversi; b) è evidente che l'indicazione fornita dalla legge è palesemente ridondante dato che se l'aria salubre non è sufficiente essa diventa rapidamente insalubre. Quindi il concetto chiave non è la quantità sufficiente, ma l'aria salubre, e la quantità sufficiente è appunto (e soltanto) quella che la fa rimanere salubre. Esempio: se in un capannone con un volume 10000 m³ lavorano soltanto tre soggetti, si potrebbe evitare di immettere aria esterna per molto tempo: essi disporranno comunque di aria salubre per l'intera durata della loro attività.

Queste elementari considerazioni logiche sono peraltro supportate anche dalla normativa tecnica. La norma UNI/TS 11300-1 chiarisce infatti che, se è possibile ragionare in termini di portata di aria in fase di progettazione, è assolutamente necessario ragionare in termini di concentrazione di sostanze inquinanti in fase di valutazione. Le motivazioni di tale scelta sono riconducibili ai principali elementi caratterizzanti i due approcci.

2.3.2 Metodo indiretto (prescrittivo)

Ragionare in termini di portata d'aria implica la conoscenza

- di quanta aria è richiesta in un dato ambiente per ottenere condizioni accettabili (l'obiettivo);
 - di quanta aria esterna viene effettivamente immessa in quell'ambiente (il dato).
- 1) la portata d'aria richiesta (l'obiettivo) non è un valore univocamente fissato dalla legge, come ad esempio il valore di azione per il livello di esposizione a rumore, o dalla normativa tecnica, come ad esempio il valore limite del PMV (Predicted Mean Vote) per il comfort termico. Al contrario, essa va calcolata di

volta in volta tenendo conto di aspetti spesso non banali da quantificare come il numero di soggetti che operano nell'ambiente e l'attività metabolica di tali soggetti. Inoltre, dare per scontate le caratteristiche di purezza dell'aria esterna può essere causa di errata valutazione.

- 2) la stima della portata d'aria esterna effettivamente immessa nell'ambiente (il dato) è a sua volta molto complessa perchè essa deve includere sia il contributo dovuto alla ventilazione meccanica sia il contributo dovuto alla ventilazione naturale.
 - 2a Riguardo alla ventilazione meccanica, va sottolineato il fatto che la quantità di aria immessa dall'esterno è nella maggior parte dei casi solo una frazione dell'intera quantità di aria immessa, essendo questa caratterizzata da un contributo di rinnovo (aria esterna) e da un contributo di ricircolo (aria di apporto). Non è semplice verificare le quote relative dei due contributi, se non sulla base del progetto dell'impianto, la cui aderenza alla realtà dei fatti è spesso dubbia. In aggiunta, risulta difficile stabilire quale riduzione del carico inquinante possa essere attribuita alla filtrazione. Infine, esiste un ulteriore problema legato alla cosiddetta efficacia di ventilazione, ovvero la capacità di "distribuzione" dell'aria immessa nell'ambiente, in grado di impedire stratificazioni e/o correnti di aria con conseguenti sacche di inquinante.
 - 2b Riguardo alla ventilazione naturale, ci sono diversi aspetti da sottolineare. Innanzitutto, c'è il fatto che essa si divide grossolanamente in due contributi, uno detto continuo ed uno detto discontinuo. La ventilazione naturale continua consiste dell'aria che in ogni istante si infila attraverso gli infissi. La ventilazione naturale discontinua consiste dell'aria che entra/esce dalle finestre/porte in occasione delle aperture di queste. In entrambi i casi una "misura" in senso stretto del flusso d'aria immesso in un ambiente non soltanto è difficile ma soprattutto è inutile. Le ragioni che determinano la difficoltà della misura sono: a) la forma delle superfici di ingresso del flusso. Sia nel caso della ventilazione continua che della ventilazione discontinua si ha a che fare con superfici che o per dimensioni o per forma, sono difficilmente conciliabili con le tecniche di misura; b) la ridotta entità del flusso. Ciò che rende un'eventuale misura inutile è l'estrema variabilità del flusso, dovuta alle mutevoli condizioni meteo esterne. In sintesi, è estremamente difficile, per non dire impossibile, sapere quanta aria "tipicamente" entra in / esce da un certo ambiente, per ventilazione naturale.

2.3.3 Metodo diretto (prestazionale)

Ragionare in termini di concentrazione di inquinanti è assai meno complicato. Rispetto all'uso della portata d'aria, la concentrazione di inquinanti stabilisce limiti "assoluti" determinati semplicemente dalle caratteristiche di accettabilità legate a

loro volta alle loro proprietà e alla sensibilità umana a tali sostanze. Tali limiti, pertanto, non dipendono nè dalla densità dei soggetti presenti, nè dalla loro attività metabolica, né dalla tipologia né dalla densità degli arredi.

Va ribadito che se stiamo affrontando la valutazione della qualità dell'aria è perché è stato preliminarmente verificato che le concentrazioni delle sostanze inquinanti sono sufficientemente basse da non dar luogo a nessun tipo di rischio per la salute. I limiti sono "diretti" in quanto stabiliti rispetto alla reale quantità dell'agente di discomfort che va tenuta sotto controllo (l'analogo concettuale, ad esempio, del livello sonoro); al contrario i limiti sulla portata d'aria sono limiti "indiretti", in quanto relativi all'azione da mettere in campo affinché (presumibilmente) non si generi una situazione inaccettabile.

L'enorme attenzione dedicata negli ultimi cinquanta anni al problema dell'inquinamento ambientale ha determinato una buona conoscenza degli effetti di molte sostanze sugli individui esposti. I valori limite sintetizzati nei documenti del World Health Organization (WHO 2010, 2021) sono stati ottenuti considerando gli effetti, sia acuti che cronici, sulla salute pubblica. Tuttavia, integrando tale quadro con informazioni contenute in diversi documenti tecnici internazionali, è possibile ricavare delle indicazioni anche sulle soglie di accettabilità per le concentrazioni di alcune di tali sostanze con riferimento al comfort ovvero alla qualità dell'aria. Sebbene sia attualmente complesso articolare tali soglie di accettabilità con un livello di dettaglio comparabile a quello presente nella normativa tecnica (ed in particolare nella norma UNI EN 16798-1) per le portate d'aria e per la concentrazione di CO₂, ciò nondimeno si ritiene che il valore di concentrazione misurato sia oggi confrontabile in molte circostanze con una soglia di accettabilità di provata solidità. A quanto finora detto, si aggiunge che la verifica di tali soglie di accettabilità è resa immediata dalla semplicità della misura richiesta. Per molte sostanze sono infatti disponibili sensori che consentono una misura in tempi molto brevi, con costi minimi e con precisione assolutamente accettabile.

In coerenza con lo schema formale sviluppato nella norma UNI EN 16798-1, in questo quaderno sono state individuate, per numerose sostanze, soglie di accettabilità articolate su tre o quattro categorie. L'assegnazione di un dato ambiente ad una categoria non è tuttavia discussa all'interno di alcuna norma o documento tecnico. Per colmare questa lacuna, nel presente quaderno viene presentato un metodo di classificazione che consente, qualunque sia la situazione che viene indagata, di attribuire la corretta categoria. Tale metodo verrà illustrato nel successivo capitolo 3.

3. Criterio di classificazione

Un metodo per identificare la corretta categoria da assegnare all'ambiente in esame, e quindi del corretto intervallo di accettabilità da utilizzare ai fini della valutazione del comfort, è stato sviluppato negli ultimi anni, partendo dalle indicazioni inizialmente presentate nella tabella 1 della (ritirata) norma UNI EN 15251 e successivamente riprese nella tabella 3 della norma UNI CEN/TR 16798-2, qui riprodotte nella tabella 3.1.

Categoria	Livello di aspettativa	Definizione
I	Alto	Livello che dovrebbe essere adottato in presenza di individui con necessità particolari (bambini, anziani, handicappati)
II	Medio	Livello normalmente usato per il progetto e l'utilizzo
III	Moderato	Livello che consente di mantenere l'ambiente accettabile. Introduce qualche rischio di perdita di performance
IV	Basso	Livello che dovrebbe essere adottato soltanto per una parte limitata dell'anno o in spazi con permanenza limitata

Tabella 3.1 - Definizione qualitativa delle categorie (UNI CEN/TR 16798-2, Tabella 3)

Nella tabella 3.1 compaiono tre elementi di particolare importanza:

- 1) l'associazione esplicita della categoria I con individui con requisiti speciali (persone con disabilità motoria, malati, bambini, anziani);
- 2) il riferimento nella definizione della categoria III al concetto di performance;
- 3) l'indicazione che la categoria IV risulta accettabile soltanto "per una parte limitata dell'anno".

Come già discusso in numerosi lavori sul comfort termico (ad esempio del Gaudio et al. 2009, del Gaudio et al. 2010), non esiste attualmente alcun criterio standardizzato per assegnare una categoria ad un determinato ambiente, o ad un determinato soggetto. In questo quaderno viene esteso alla qualità dell'aria il metodo originariamente sviluppato per gli ambienti termici, che è di fatto un tentativo per rendere quantitativi, e quindi oggettivi, i criteri presentati nella tabella 3.1, che in quanto qualitativi si prestano ad inevitabili interpretazioni e quindi ad un'ampia variabilità fra i diversi attori che si trovano ad applicarla in diversi contesti.

Esso si basa su tre elementi ai quali risultano assegnati altrettanti fattori:

- la sensibilità del soggetto (F_s),
- l'accuratezza del compito svolto (F_A),
- la praticabilità di soluzioni di manipolazione tecnica (F_T).

Tutti e tre questi fattori variano in una scala da 0 a 10.

Sensibilità del soggetto

Il fattore di sensibilità del soggetto (F_S) è determinato secondo la seguente tabella 3.2:

Individuo	Fattore di sensibilità F_S
Età $y < 14$ anni	$F_S = 7,5 + 2,5 \times \tanh\left(\frac{7-y}{3}\right)$
Età $y > 60$ anni	$F_S = 7,5 + 2,5 \times \tanh\left(\frac{y-72}{6}\right)$
Disabili o soggetti affetti da handicap motorio	10
Donne in gravidanza	8
Tutti gli altri	5
Presenza di patologie che riducono la termoregolazione del soggetto	+2

Tabella 3.2 - Fattori di sensibilità di varie tipologie di soggetti

Accuratezza del compito

Per la determinazione del fattore di accuratezza del compito (F_A) è stata ricavata una tabella con criterio analogo alla norma tecnica UNI EN 12464-1 che indica le necessità di illuminazione dei luoghi di lavoro. La tabella 3.3 riporta un estratto, mentre la versione completa è reperibile nel lavoro di del Gaudio *et al.* (2010).

Attività	Fattore di accuratezza F_A
artigiano ed operaio	6
commesso/ addetto vendita	4
professione tecnica nelle scienze, ingegneria e assimilabili	8
impiegato d'ufficio	6/8
addetto alle pulizie	4
chirurgo (sala operatoria/pronto soccorso)	10
sportivo	8
portiere/custode	4/6
cuoco/addetto alla preparazione alimenti	6/8
addetto al magazzino/carico e scarico merci	4
insegnante/alunno	8

Tabella 3.3 - Fattori di accuratezza del compito di diverse attività

Manipolabilità tecnica

La "praticabilità" di soluzioni di manipolazione tecnica dell'ambiente (condizionamento o semplice ventilazione), viene quantificata mediante il descrittore F_T . La quantità F_T è associata all'ambiente nel quale avviene l'esposizione. Essa assume un valore più alto quando la tipologia di edificio è tale da non creare seri impedimenti alla realizzazione di impianti meccanici di condizionamento o ventilazione, mentre assume un valore più basso quando tali impedimenti esistono. La tabella 3.4 contiene i valori di F_T attribuiti alle diverse tipologie di ambienti.

Tipologia di edificio	Manipolabilità	Fattore tecnico F_T
Edificio in cemento armato e in acciaio	Completa	8-10
Edificio prefabbricato	Forte	5-7
Edificio di pietra/mattoni	Limitata	3-5
Edificio con vincoli storici	Nulla	2

Tabella 3.4 - Fattori di manipolabilità tecnica di diverse tipologie di edifici

I tre fattori così quantificati vengono opportunamente pesati e combinati mediante l'algoritmo

$$F_C = (F_S)^{5/3} \times (F_A)^{4/3} \times (F_T)^1 \quad (3.1)$$

Il valore F_C permette di individuare la categoria da assegnare all'ambiente o alla specifica condizione lavorativa presa in esame:

- $3000 < F_C \leq 10000$ categoria I
- $750 < F_C \leq 3000$ categoria II
- $250 < F_C \leq 500$ categoria III
- $0 < F_C \leq 250$ categoria IV

Seppure privo di valenza normativa, il criterio basato sul punteggio F_C consente di assegnare una categoria (I II III o IV) a qualsiasi situazione ambientale, e di conseguenza stabilire quali siano le corrette soglie di accettabilità che vi si devono applicare. La figura 3.1 sintetizza il percorso che conduce all'assegnazione della corretta categoria.

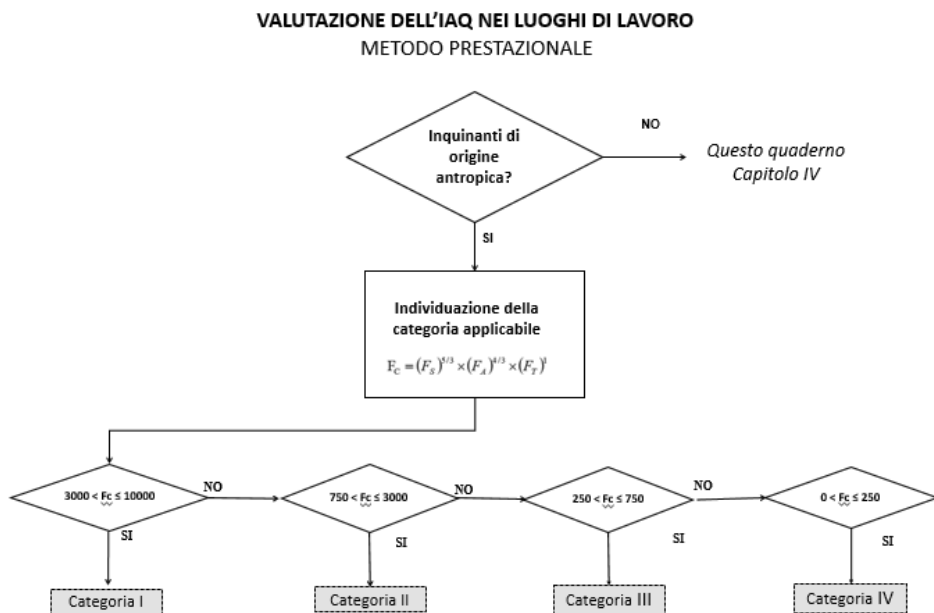


Figura 3.1 - Diagramma di flusso per l'assegnazione della categoria

Negli ambienti in cui coesistono individui con sensibilità diverse e/o che eseguono compiti che richiedono una diversa accuratezza, esistono due possibilità:

- 1) se fattibile, si realizzano condizioni di ventilazione diverse in zone diverse, ovvero si esegue una partizione dello spazio che assicuri ai diversi individui le specifiche condizioni di comfort;
- 2) altrimenti, per il principio di maggior cautela, si suggerisce di utilizzare per tutti i soggetti presenti la classe di comfort più elevata fra quelle identificate nell'analisi.

4. Sostanze di origine antropica

4.1 Descrittori

Le sostanze di origine antropica sono comunemente divise fra quelle emesse attraverso la traspirazione/sudorazione, e quelle emesse attraverso la respirazione.

4.1.1 Sostanze emesse per traspirazione/sudorazione

Le prime sono collettivamente note come bioeffluenti e rappresentano una famiglia molto numerosa di sostanze spesso presenti in concentrazioni minime. Nonostante recenti progressi tecnologici (naso artificiale) una misura affidabile di tali sostanze risulta ad oggi molto difficile per non dire impossibile. La loro consistenza può essere tuttavia stimata con buona precisione grazie alla esistenza di una ottima correlazione lineare fra l'emissione dei bioeffluenti e l'emissione (associata alla respirazione) di CO₂. Tale correlazione nelle emissioni ne implica un'altra, anch'essa lineare nelle concentrazioni. Poiché la concentrazione di bioeffluenti nell'aria esterna è trascurabile, mentre la concentrazione di CO₂ nell'aria esterna non lo è affatto, la correlazione che si stabilisce è fra la concentrazione assoluta dei bioeffluenti e la concentrazione differenziale (interno - esterno) di CO₂, nel seguito indicata per brevità con il simbolo ΔCO_2 .

4.1.2 Sostanze emesse per respirazione

Le seconde formano anch'esse una famiglia molto numerosa, che si è scelto di rappresentare mediante la sostanza con la concentrazione più elevata (a parte il vapore acqueo) nell'aria espirata, ovvero la CO₂. Tale sostanza risulta pertanto coinvolta nella valutazione dell'inquinamento di origine antropica sia come tracciante dei bioeffluenti emessi nella traspirazione, sia come descrittore del processo di respirazione.

Si è molto discusso, ed in una certa misura si continua a discutere, del possibile ruolo della CO₂ come agente inquinante in sé. Tuttavia, la maggior parte degli studi svolti indica che le concentrazioni alle quali la CO₂ produce un effetto negativo, sia sulla percezione della IAQ sia sulla performance, sono nettamente superiori a quelle alle quali essa indica, come tracciante, la presenza di sostanze bioeffluenti in quantità chiaramente percettibile (Zhang et al. 2017).

In sintesi, la valutazione di accettabilità delle sostanze di origine antropica si esegue mediante la concentrazione differenziale di CO₂. Per quanto detto sopra infatti, tale quantità è direttamente collegata alla concentrazione di sostanze bioeffluenti, e di conseguenza al sistema percettivo umano, e quindi per essa è possibile individuare alcune soglie assolute che non vanno superate.

4.2 Soglie di accettabilità

In assenza di indicazioni quantitative nella legislazione italiana, il riferimento per le soglie di accettabilità della concentrazione di CO₂ diventa la normativa tecnica, ed il documento cardine in questo senso è la norma UNI EN 16798-1.

Come già anticipato al punto 4.1.1, la concentrazione di CO₂ nell'aria esterna non è trascurabile rispetto ai valori misurati in ambiente indoor. Di conseguenza, come evidente dall'esame della tabella 4.1, ripresa dalla tabella B.9 della norma UNI EN 16798-1, tali soglie vengono fornite non sulla concentrazione assoluta ma sulla concentrazione differenziale (interna - esterna) ΔCO_2 .

Dato che la concentrazione di CO₂ surroga le concentrazioni delle sostanze bio-effluenti, alle quali l'essere umano possiede una spiccata sensibilità olfattiva, le soglie di accettabilità vanno considerate relative a tempi scala brevi (alcuni minuti).

Sorgente	Sostanza	Soglie di accettabilità per la concentrazione differenziale, articolate per categorie (ppm)			Riferimenti
		I	II	III - IV	
Antropica	CO ₂	550	800	1350	UNI EN 16798-1

Tabella 4.1 - Soglie di accettabilità per la concentrazione differenziale di CO₂ (UNI EN 16798-1, Tabella B.9)

Per avere un'idea di quali siano le concentrazioni indoor associate a queste soglie di accettabilità è necessario stabilire quali siano le tipiche concentrazioni outdoor. Uno studio di una tipica realtà urbana italiana (Gratani e Varone 2005) ha determinato un eccesso di circa 100 ppm rispetto alla concentrazione del fondo a livello globale (477 ppm contro circa 375 ppm al 2004). La differenza fra un ambiente urbano ed un ambiente rurale è stata investigata da George et al. (2007) che hanno determinato un eccesso di 66 ppm per l'ambiente urbano. L'attuale - Giugno 2023 - concentrazione di fondo a livello globale di CO₂ indicata dalla National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) è pari a circa 420 ppm. Di conseguenza possiamo indicare come valori tipici 520 ppm per un ambiente urbano e 455 ppm per un ambiente rurale. Il limite differenziale della categoria II, che probabilmente troverà applicazione nella maggior parte dei casi, conduce pertanto ad un limite sulla concentrazione indoor di CO₂ fra 1255 ppm (rurale) e 1320 ppm (urbano), decisamente più elevato del limite di 1000 ppm divenuto popolare a partire dagli anni '80 (si veda ad esempio lo standard ANSI/ASHRAE 62-1). I limiti sulla concentrazione indoor delle categorie III e IV si collocano invece fra 1805 e 1870 ppm.

4.3 Percentuale di insoddisfatti associata alla concentrazione di CO₂

L'accettabilità della qualità dell'aria può essere quantificata mediante la scala a 3 punti (Fang *et al.* 1998) mostrata nella figura 4.1.

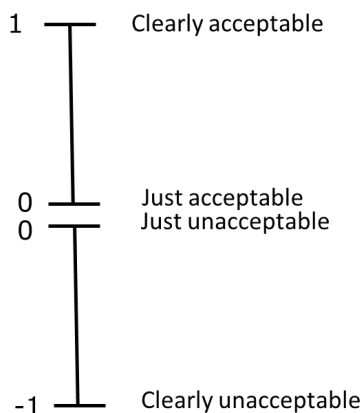


Figura 4.1 - Accettabilità della sensazione olfattiva (Fang *et al.* 1998)

La frazione di soggetti che esprimono un giudizio inferiore a zero è detta percentuale di insoddisfatti ed è indicata con il simbolo PD, acronimo di Percentage of Dissatisfied.

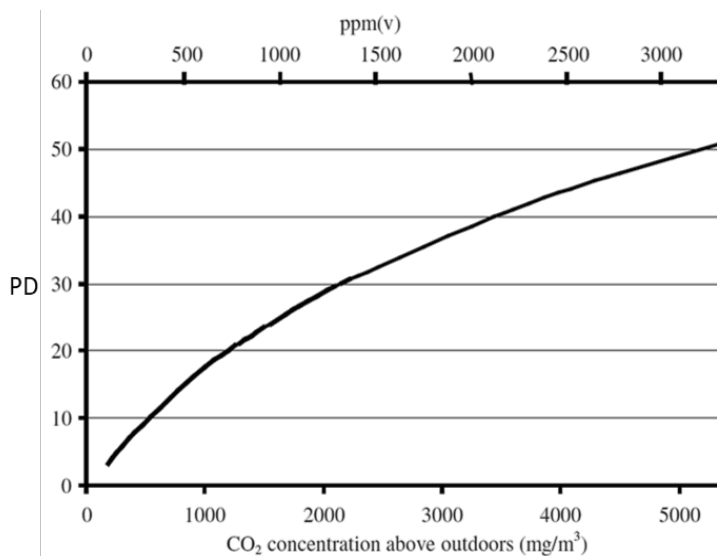


Figura 4.2 - Percentuale prevista di insoddisfatti PD in funzione della concentrazione differenziale di CO₂ (EC 1992)

Essendo la concentrazione differenziale ΔCO_2 strettamente correlata con la concentrazione di sostanze bioeffluenti, ed essendo quest'ultima la principale causa del discomfort prodotto da una modesta qualità dell'aria, è logico attendersi che ΔCO_2 sia un buon predittore della percentuale di insoddisfatti PD. Le cose stanno in effetti in questi termini.

L'associazione fra percentuale di insoddisfatti e concentrazione differenziale di CO_2 è mostrata nella figura 4.2 ed è approssimabile mediante l'espressione analitica (EC 1992)

$$\text{PD} = 395 \times \exp(-15,15 \times \Delta\text{CO}_2^{-0,25}) \quad (4.1)$$

Dall'equazione (4.1) si deduce che i tre valori limite associati rispettivamente alla categoria I, alla categoria II e alle categorie III e IV, corrispondono a valori di PD pari al 17%, 23% e 32%, che la tabella B.6 della UNI EN 16798-1 approssima a 15%, 20% e 30% rispettivamente.

Mantenendo la percentuale di insoddisfatti della classe II intorno al 20% si è probabilmente cercato di preservare la coerenza con la classica definizione di qualità dell'aria nella quale si definisce come accettabile un'aria giudicata positivamente da almeno l'80% degli occupanti (ANSI/ASHRAE 62.1). I valori di PD sopra citati stabiliscono inoltre una implicita minor criticità per l'agente di discomfort "Concentrazione di CO_2 " rispetto all'agente di discomfort "Microclima" dato che i valori limite della percentuale di insoddisfatti stabiliti nella norma UNI EN 16798-1 per le prime tre classi del comfort termico sono rispettivamente 6%, 10% e 15%.

5. Sostanze generate dai materiali edilizi/di arredo e dalle lavorazioni

5.1 Descrittori

5.1.1 Sostanze emesse dai materiali edilizi e di arredo

I materiali utilizzati per la costruzione (edilizi) e per gli arredi rilasciano nell'ambiente una grande varietà di sostanze, la maggior parte in concentrazioni minime. Di fatto risulta impossibile misurarle tutte e peraltro sarebbe inutile farlo alla luce della indisponibilità di valori limite di accettabilità, conseguenza della limitata conoscenza sulla sensibilità umana a queste sostanze.

Sulla base di numerose e convergenti indicazioni, da oltre venti anni la commissione europea (ECA 1997a; ECA 1997b) ha identificato il complesso dei composti organici volatili (TVOC) e la formaldeide (HCHO) come descrittivi delle sostanze emesse dai materiali di arredo. In questo quaderno assumiamo TVOC e HCHO come rappresentanti dell'intera classe di sostanze emesse da materiali edilizi e di arredo, e di conseguenza assumiamo che il rispetto dei limiti su queste due sostanze possa essere interpretato come una accettabilità complessiva dell'intera famiglia delle sostanze emessa dai materiali.

Un caso a parte è rappresentato dal Radon, un gas radioattivo che viene rilasciato da alcuni materiali da costruzione. Si tratta di un riconosciuto agente cancerogeno per il quale esistono limiti di legge sia per i luoghi di lavoro sia per gli ambienti residenziali. Tuttavia, il suo impatto sull'IAQ risulta nullo dato che esso è impercettibile a livello sensoriale, sia olfattivo che irritativo. Pertanto, esso viene ignorato in questo quaderno.

5.1.2 Sostanze emesse dalle lavorazioni eseguite

Va innanzitutto ricordato quanto già chiarito nel capitolo 2, ovvero che quando una lavorazione genera una o più sostanze in concentrazioni tali da risultare dannose/pericolose, il datore di lavoro è tenuto alla valutazione del rischio per la salute per esposizioni a sostanze pericolose (d.lgs. 81/2008 Titolo IX). Questo caso è estraneo alla valutazione della qualità dell'aria indoor oggetto del presente quaderno.

Fra le sostanze emesse dalle lavorazioni, quelle più rilevanti sono:

- il monossido di carbonio;
- gli idrocarburi aromatici, sia con strutture più semplici (naftalene, stirene, toluene, xylene) sia di tipo policiclico, collettivamente noti come IPA (o PAHs dall'inglese Polycyclic Aromatic Hydrocarbons).

Entrambi sono associati a processi di combustione.

Riguardo al monossido di carbonio, esso verrà trattato nel punto 5.2 assieme ad altri inquinanti di origine esterna.

Riguardo agli IPA, essi risultano molto difficili da misurare. Fortunatamente, l'emissione di queste sostanze risulta ben correlata a quella del particolato PM_{2,5}, che svolge quindi il ruolo di proxy che il biossido di carbonio svolge per i bioeffluenti. Il particolato verrà trattato nel punto 5.3.

5.2 Soglie di accettabilità

5.2.1 *Tempi di media*

Analogamente al discomfort termico, anche il discomfort sensoriale dovuto ad una insufficiente qualità dell'aria si manifesta su tempi relativamente brevi (in genere qualche minuto). Pertanto, per coerenza, anche i valori limite di accettabilità devono essere riferiti a tempi di media corrispondentemente brevi.

I diversi documenti che contengono valori limite e soglie di accettabilità (WHO 2021, UNI EN 16798-1 e altri) propongono un quadro assai poco omogeneo, fatto di valori relativi a tempi di media molto eterogenei, e talvolta con più valori limite, associati a tempi di media diversi, per la stessa sostanza. In questo quaderno è stato pertanto tentato un lavoro di sintesi che integri i valori riferiti a tempi medio-brevi, quando disponibili nei documenti più volte citati, con stime derivate al meglio delle nostre conoscenze.

Per cinque degli inquinanti che verranno discusse in questo e nel successivo capitolo 6 (TVOC, CO, O₃, PM_{2,5}, PM₁₀), la tabella A.9 dell'allegato A (nazionale) della norma UNI EN 16798-1, attualmente in fase di pubblicazione, contiene delle soglie di accettabilità (indicate con la denominazione "recommended design values") per le tre categorie I II III. Per la valenza formale che deriva dall'inclusione in una norma tecnica nazionale, sembrerebbe che queste soglie di accettabilità/valori limite rappresentassero una scelta ideale anche per questo quaderno. Tuttavia, come chiarito all'interno della stessa tabella A.9, tutte le soglie di accettabilità vanno intese come medie annuali, per cui la loro verifica richiederebbe misure estese su tempi estremamente lunghi, del tutto incompatibili con i tempi scala del discomfort discussi al precedente punto 5.2.1. Allo scopo di adattare tali soglie di accettabilità al contesto discusso in questo quaderno si è fatto ricorso ai valori limite a breve (24 h) e lungo (1 anno) termine, presenti nel documento WHO 2021. Confrontando questi due set di valori limite per quattro diverse sostanze, si deduce che il valore limite sulle 24 h è sempre fra 1,5 e 3 volte più alto del valore limite su 1 anno. In questo quaderno adottiamo un fattore tipico di conversione pari a 2,5. I valori limite cosiddetti short-term che compaiono nel documento WHO (2021) sono tutti medi su 24 ore eccetto quello sull'ozono che è medio su 8 ore (vedi la tabella 3.24 del documento originale). In considerazione della presumibile stazionarietà della concentrazione degli inquinanti di origine non antropica, si è ritenuto che questi tempi di media siano applicabili all'obiettivo (la valutazione del comfort) di questo quaderno.

5.2.2 Soglie di accettabilità e valori limite

Come apparirà evidente nel seguito, nell'individuazione delle soglie di accettabilità si è fatto ricorso anche i valori limite indicati nei documenti redatti dal WHO nel 2010 e nel 2021. È ben noto che i documenti WHO non considerano questioni legate al comfort ma alla salute dei soggetti esposti. Anche il più basso dei valori indicati dai documenti WHO, il cosiddetto Air Quality Guideline Level (AQG) possiede una definizione in termini sanitari, ovvero "livello al di sotto del quale effetti avversi per la salute non avvengono o sono minimi". Sembrerebbe quindi che nella individuazione di soglie di accettabilità per la qualità dell'aria, soltanto valori pari o inferiori ad AQG fossero possibili. Riguardo ad una scelta di questo tipo vanno fatte tre considerazioni:

- a) i valori limite WHO compaiono diffusamente nella già citata norma UNI EN 16798-1 che nel proprio titolo chiarisce al di là di qualsiasi dubbio come essa si occupi di indoor air quality tanto nella progettazione quanto nella valutazione degli edifici. Di più: i valori che compaiono nella tabella B.21 della UNI EN 16798-1 per tempi di media di 24 h non sono AQG ma Interim Values ovvero valori superiori (CO_2 , $\text{PM}_{2.5}$ e PM_{10}). Esiste dunque un precedente molto autorevole all'utilizzo di valori limite WHO superiori ad AQG nel contesto della qualità dell'aria;
- b) sotto AQG si entra in una "terra di nessuno" in cui non esistono riferimenti per identificare uno o più soglie di accettabilità;
- c) concentrazioni significativamente inferiori ad AQG sono difficilmente riscontrabili in una grande frazione dei posti di lavoro

5.2.3 Formaldeide (HCHO)

L'unione europea impone un limite cogente per i lavoratori, medio sulle 8 ore, di 0.3 ppm ($370 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Tale limite mira a prevenire irritazione negli organi sensoriali degli individui esposti. Tuttavia, esso non sembra in grado di impedire sensazioni di "fastidio" e di odore sgradevole (EC 2019) dato che la soglia olfattiva è di 0,13 ppm = $155 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Un valore limite leggermente più basso ($100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ or 0,083 ppm su 30 minuti) è adottato dall'Organizzazione Mondiale della Sanità (WHO 2010) per prevenire irritazione nella popolazione generale. Un valore simile è adottato dall'ACGIH ($0.1 \text{ ppm} = 120 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Le linee guida per la gestione della qualità dell'aria di Hong Kong (Hong Kong Guide to Indoor Air Quality Management, nel seguito indicate con l'acronimo HKGIAQM) forniscono due valori, $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ come soglia di eccellenza e $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ come soglia di accettabilità.

Sulla base di queste indicazioni, è stato individuata la soglia di accettabilità più bassa

- Categoria III/IV – $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$

Tale valore coincide con quelli presenti:

- nella tabella B.17 della UNI EN 16798-1 per edifici “low polluting”;
- nel documento WHO 2010;
- nel documento HKGIAQM come soglia di accettabilità minima.

Esso è inoltre prossimo al valore limite adottato dall'ACGIH ($120 \mu\text{g}/\text{m}^3$) e inferiore alla soglia olfattiva fissata a $155 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

I valori limite per le altre categorie sono stati ottenuti applicando gli stessi fattori di scala (pari a 1:1,5 e 1:2,5 per le categorie II e I rispettivamente) assunti per la concentrazione differenziale di CO_2 nella tabella B.9 della UNI EN 16798-1 (e qui riportati nella tabella 4.1).

Si sono in tal modo ottenuti i seguenti valori:

- Categoria II – $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$
- Categoria I – $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

A supporto del limite sulla categoria II può essere citato il fatto che un valore pressochè identico ($62 \mu\text{g}/\text{m}^3$) viene indicato come limite di accettabilità al punto 4.1.3 del Decreto del Ministero della Transizione Ecologica del 23 giugno 2022 (Criteri ambientali minimi per l'affidamento del servizio di fornitura, noleggio ed estensione della vita utile di arredi per interni). Per quanto il decreto sui criteri ambientali minimi sia formalmente limitato all'ambito dell'edilizia pubblica, il valore che esso indica rappresenta un riferimento di fatto per qualsiasi tipologia edilizia.

Infine, a supporto del limite sulla categoria I va citato il fatto che esso risulta prossimo al valore di $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ citato dalla tabella B.17 della UNI EN 16798-1 come associato alla classe di qualità più alta, ovvero per edifici “very low polluting”, come pure dal documento HKGIAQM come soglia di eccellenza.

5.2.4 Composti organici volatili totali (TVOC)

I TVOC fanno parte delle sostanze per le quali sono disponibili soglie di accettabilità medie su un anno nella tabella A.9 dell'allegato A alla UNI EN 16798-1 pari rispettivamente a 100, 150 e $250 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Utilizzando il fattore di conversione 2,5 individuato al punto 5.2.1, esse sono state essere riconvertite in soglie di accettabilità medie su 24 h ottenendo: Categoria I – $250 \mu\text{g}/\text{m}^3$; Categoria II – $375 \mu\text{g}/\text{m}^3$; Categoria III – $625 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Esaminando il quadro internazionale: il documento HKGIAQM fornisce due valori, $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ come soglia di eccellenza e $600 \mu\text{g}/\text{m}^3$ come soglia di accettabilità; il documento WHO 2010, pur non presentando valori limite per l'insieme dei TVOC, indica valori limite per singoli composti organici volatili che supportano un valore limite per i TVOC 7 – 8 volte superiore a quello per la formaldeide. Questo fattore di scala fra soglie di accettabilità sui TVOC e sulla formaldeide è peraltro vicino a quelli che si ottengono confrontando, per le categorie I e III, i valori derivati per la

formaldeide al punto 5.2.3 e i valori riportati in questo punto 5.2.4 provenienti dal documento HKGIAQM (rispettivamente pari a 5 e 6).

Mediante l'analisi congiunta dei valori di origine nazionale e internazionale, e ritenendo eccessivo un dettaglio superiore ad una cifra significativa, sono state ottenute le seguenti soglie limite di accettabilità:

- Categoria I – 200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
- Categoria II – 400 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
- Categoria III/IV – 600 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

Va chiarito che le soglie di accettabilità ricavate come descritto si applicano all'insieme dei TVOC, escluso il benzene. Infatti, benchè formalmente il benzene faccia parte dei VOC, tuttavia esso non viene rilasciato in quantità significative dai materiali edilizi/di arredo e di conseguenza esso non viene considerato in questo capitolo 4. Esso al contrario si trova in concentrazioni apprezzabili nell'aria esterna, e per questo motivo verrà discusso nel successivo capitolo 6.

5.2.5 Sintesi

La tabella 5.1 sintetizza i valori limite di accettabilità per le sostanze emesse dagli arredi, ricavati come dettagliato nei punti 5.2.3 e 5.2.4.

Sorgente	Sostanza	Soglie di accettabilità ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)			Riferimenti
		I	II	III - IV	
Arredi	HCHO (Formaldeide)	40	60	100	Punto 5.2.3
Arredi	TVOC	200	400	600	Punto 5.2.4

Tabella 5.1 - Soglie di accettabilità per le sostanze generate da arredi e materiali edilizi

6 Sostanze inquinanti presenti nell'aria esterna

6.1 Individuazione degli inquinanti gassosi rilevanti per la qualità dell'aria

Gli inquinanti gassosi di origine esterna transitano molto spesso tal quali dall'ambiente nel quale vengono generati all'ambiente interno pregiudicandone, ovviamente, la qualità dell'aria. Ciò avviene sfruttando:

- l'apertura di finestre (aerazione) o la presenza di infissi non perfettamente installati (infiltrazione);
- l'assenza di specifici dispositivi nei punti di prelievo e nello stadio di filtrazione degli impianti meccanici.

Riguardo a questi inquinanti, le due principali norme tecniche relative alla qualità dell'aria indoor presentano due approcci chiaramente distinti: da una parte la tabella B.21 della norma UNI EN 16798-1 contiene una lista di dieci sostanze (o gruppi di sostanze come gli IPA), di prevalente origine outdoor. Dall'altra, la tabella E.1 dello standard ANSI/ASHRAE 62.1 è invece assai più contenuta e limita a cinque le sostanze listate. La tabella 6.1 sintetizza il quadro normativo.

Inquinante	UNI EN 16798-1	ANSI/ASHRAE 62.1
Benzene (C ₆ H ₆)	X	
Biossido di Azoto (NO ₂)	X	X
Biossido di Zolfo (SO ₂)	X	X
Idrocarburi Policiclici Aromatici (IPA)	X	
Monossido di Carbonio (CO)	X	X
Naftalene (C ₁₀ H ₈)	X	
Piombo (Pb)		X
Ozono (O ₃)	X	X
Radon (Rn)	X	
Tetracloroetilene (C ₂ Cl ₄)	X	
Tricloroetilene (C ₂ HCl ₃)	X	

Tabella 6.1 - Inquinanti gassosi di origine outdoor listati nella normativa tecnica

In questo quaderno è stato adottato l'approccio ANSI/ASHRAE, con l'ulteriore rimozione esplicita del piombo (discussa nel seguito), e di conseguenza sono state considerate soltanto le seguenti quattro sostanze: monossido di carbonio, biossido di zolfo, biossido di azoto e ozono. Riguardo alle sostanze che non

vengono considerate in questo quaderno ma compaiono nella norma UNI EN 16798-1 possono essere fatte le seguenti considerazioni:

- va innanzitutto premesso quanto già chiarito nel capitolo 2, ovvero che quando vengono a crearsi concentrazioni di sostanze tali da risultare dannose/pericolose, il datore di lavoro è tenuto alla valutazione del rischio per la salute per esposizioni a sostanze pericolose (d.lgs. 81/2008 Titolo IX). Questo caso è estraneo alla valutazione della qualità dell'aria indoor oggetto del presente documento. In questa fattispecie rientra senz'altro il radon, il quale come già discusso al punto 5.1, è un riconosciuto agente cancerogeno ma al contempo risulta del tutto impercettibile a livello sensoriale, sia olfattivo che irritativo.
- Considerazioni simili, anche se non identiche, possono essere fatte per il benzene e per il benzo(a)pirene: anche se queste sostanze non sono affatto prive di effetti sensoriali, le loro soglie olfattive sono largamente superiori alle soglie ritenute adeguate al fine di tutelare gli esposti dal rischio cancerogeno associato a queste sostanze. Soglie che, incidentalmente, sono ancora oggi oggetto di discussione visto che i documenti WHO non presentano valori numerici, e la direttiva 2008/50/CE, recepita in Italia dal d.lgs. 155 del 13 agosto 2010, fissa unicamente un limite medio annuale. In sintesi, per queste sostanze, si ritiene che la tutela della salute automaticamente implichi anche una accettabile qualità dell'aria.
- Riguardo agli idrocarburi policiclici aromatici (IPA), come già discusso al punto 5.1.2, la loro concentrazione risulta ben correlata a quella del particolato più fine, che svolge quindi il ruolo di proxy, e che verrà discusso nel punto 6.3. Si ritiene quindi che tenendo sotto controllo il $PM_{2.5}$, venga garantita anche l'accettabilità delle concentrazioni di tutti gli IPA.
- Il Piombo, insieme ad altri metalli come Arsenico (As), Cadmio (Cd) e Nichel (Ni), va a comporre la frazione inorganica del particolato PM_{10} , che verrà discusso nel punto 6.3. Vale quindi lo stesso discorso fatto in precedenza sul legame fra gli IPA e il $PM_{2.5}$.
- Infine, riguardo al naftalene, al tricloroetilene e al tetracloroetilene, tutti e tre contenuti nell'elenco presentato dalla norma UNI EN 16798-1, va sottolineato che si tratta di sostanze alle quali vengono esposti esclusivamente i lavoratori impegnati in specifiche attività industriali quali il lavaggio a secco, lo sgrassamento dei metalli e la sintesi di altre sostanze chimiche. Considerato l'uso assai specifico e limitato al mondo industriale, esse non sono state considerate in questo quaderno.

6.2 Soglie di accettabilità degli inquinanti gassosi

All'individuazione delle soglie di accettabilità relative a tutti gli inquinanti (gassosi o particellari) di origine outdoor che verranno discussi nei due punti 6.2 e 6.3 si applicano le argomentazioni presentate nei punti 5.2.1 e 5.2.2. In particolare per

le quattro sostanze (CO, O₃, PM_{2.5}, PM₁₀) verranno calcolate soglie di accettabilità riconvertite da quelle contenute nella tabella A.9 dell'allegato A (nazionale) della norma UNI EN 16798-1.

6.2.1 Biossido di Azoto

Per questo inquinante è il documento WHO global air quality guidelines WHO 2021 indica due Interim Values, pari rispettivamente a 120 µg/m³ e 50 µg/m³, ed un Air Quality Guideline (AQG) pari a 25 µg/m³. La direttiva europea 2008/EC/50, così come il suo recepimento italiano d.lgs. 155/2010, non contiene un valore limite medio su 24 h, bensì un valore limite su 1 ora (200 µg/m³) ed un valore limite su un anno (40 µg/m³). Quest'ultimo, utilizzando il consueto fattore di conversione 2,5 conduce ad un valore di 100 µg/m³ del tutto coerente con il più alto dei due interim value WHO.

Sulla base di questi dati sono stati adottate le seguenti soglie di accettabilità:

- Categoria I – 25 µg/m³
- Categoria II – 50 µg/m³
- Categoria III/IV – 100 µg/m³

6.2.2 Biossido di Zolfo

Anche per questa sostanza il documento WHO 2021 contiene due Interim Values, pari rispettivamente a 125 µg/m³ e 50 µg/m³, ed un Air Quality Guideline (AQG) pari a 40 µg/m³. La direttiva europea 2008/EC/50, così come il suo recepimento italiano d.lgs. 155/2010, individua un valore limite medio su 24 h di 125 µg/m³ coincidente con il più alto dei due interim value WHO.

Si è così giunti ad individuare le seguenti soglie di accettabilità:

- Categoria I – 40 µg/m³
- Categoria II – 50 µg/m³
- Categoria III/IV – 125 µg/m³

Vale la pena notare che sia per il biossido di azoto che per il biossido di zolfo, i rapporti fra le soglie di accettabilità ricavati in questo quaderno per le categorie I e III (rispettivamente 1:4,8 e 1:3,1) sono decisamente più ampi di quello identificato per le altre sostanze nella tabella B.9 della UNI EN 16798-1 (1:2,5).

6.2.3 Monossido di Carbonio

Utilizzando il fattore di conversione 2,5 individuato al punto 5.2.1, le soglie di accettabilità medie su 1 anno sono state riconvertite in soglie di accettabilità medie su 24 h ottenendo: Categoria I – 5000 µg/m³; Categoria II – 7500 µg/m³; Categoria III – 12500 µg/m³.

Il documento WHO 2021 contiene un Interim Value pari a 7000 µg/m³ ed un Air Quality Guideline (AQG) pari a 4000 µg/m³. La direttiva europea 2008/EC/50, così come il suo recepimento italiano d.lgs. 155/2010, indica un limite di accettabilità di

10000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$; lo stesso valore di 10000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ è citato dal documento statunitense del National Ambient Air Quality Standard (NAAQS).

Sulla base di questi dati sono stati adottate le seguenti soglie di accettabilità:

- Categoria I - 4000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
- Categoria II - 7000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
- Categoria III/IV - 10000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

6.2.4 Ozono

In analogia col percorso seguito al precedente punto 6.2.3 per il monossido di carbonio, le soglie di accettabilità medie su 1 anno contenute nella tabella A.9 della UNI 16798-1 sono state riconvertite in soglie di accettabilità medie su 24 h ottenendo: Categoria I - 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$; Categoria II - 75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$; Categoria III - 125 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Le linee guida per l'indoor del WHO (2021) contengono due Interim Values (160 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ il più alto, 120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ il più basso) ed un Air Quality Guideline (AQG) pari a 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. La direttiva europea 2008/EC/50, così come il suo recepimento italiano d.lgs. 155/2010, individua un valore limite di 120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Si è così giunti ad individuare le seguenti soglie di accettabilità:

- Categoria I - 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
- Categoria II - 75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
- Categoria III/IV - 120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

6.2.5 Sintesi

La tabella 6.2 sintetizza le soglie di accettabilità sulle concentrazioni delle diverse sostanze, ricavati come dettagliato nei diversi punti da 6.2.1 a 6.2.4.

Inquinante	Concentrazione limite ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)			Riferimenti
	I	II	III - IV	
Biossido di Azoto (NO₂)	25	50	100	Punto 6.2.1
Biossido di Zolfo (SO₂)	40	50	125	Punto 6.2.2
Monossido di Carbonio (CO)	4000	7000	10000	Punto 6.2.3
Ozono (O₃)	50	75	120	Punto 6.2.4

Tabella 6.2 - Soglie di accettabilità degli inquinanti gassosi di origine outdoor

6.3 Descrittori e soglie di accettabilità degli inquinanti particolati

6.3.1 PM_{2.5} e PM₁₀

Il particolato atmosferico viene comunemente descritto mediante le quantità PM_{2.5} e PM₁₀, che descrivono rispettivamente la concentrazione di polveri di diametro aerodinamico inferiore a 2.5 e 10 μm . Più correttamente, come definito nella norma UNI EN 12341, il PM₁₀ è "la frazione di materiale particolato sospeso in aria

ambiente che passa attraverso un sistema di separazione in grado di selezionare il materiale particolato di diametro aerodinamico di 10 μm , con una efficienza di campionamento pari al 50%"; di conseguenza segue anche la definizione di $\text{PM}_{2.5}$. Utilizzando il fattore di conversione 2,5 individuato al punto 5.2.1, le soglie di accettabilità medie su 1 anno sono state riconvertite nelle seguenti soglie di accettabilità medie su 24 h

$\text{PM}_{2.5}$: Categoria I – 12,5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$; Categoria II – 18,75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$; Categoria III – 31,25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

PM_{10} : Categoria I – 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$; Categoria II – 37,5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$; Categoria III – 62,5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Il documento WHO 2021, il quale contiene quattro diversi interim Values (pari rispettivamente a 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 37,5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) ed un Air Quality Guideline (AQG) pari a 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Il d.lgs. 155/2010 individua un valore limite di 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ per il $\text{PM}_{2.5}$ e di 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ per il PM_{10} . I limiti di legge rappresentano di fatto elementi per i quali un superamento è inappropriato anche in un contesto che non è strettamente quello ai quali tali limiti si applicano. In conclusione si è giunti ad individuare le seguenti soglie di accettabilità:

- Categoria I – 12,5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
- Categoria II – 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
- Categoria III/IV – 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

6.3.2 Sintesi

La tabella 6.3 sintetizza le soglie di accettabilità sulle concentrazioni del particolato ricavate in questo quaderno. E' interessante notare che, a differenza di quanto avviene per il biossido di azoto e per il biossido di zolfo, i rapporti fra le soglie di accettabilità ricavate in questo quaderno per le categorie I II e III degli inquinanti particellari (rispettivamente pari a 1:1,6 e 1:2) sono nuovamente vicini a quelli identificati nella tabella B.9 della norma UNI EN 16798-1 (rispettivamente pari a 1:1,5 e 1:2,5).

Inquinante	Concentrazione limite ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)			Riferimenti
	I	II	III - IV	
$\text{PM}_{2.5}$	12,5	20	25	Punto 6.3.1
PM_{10}	25	40	50	Punto 6.3.1

Tabella 6.3 - Soglie di accettabilità degli inquinanti particellari di origine outdoor

7. Misure

Analogamente a quanto avviene per il comfort termo-igrometrico, la normativa tecnica sulla qualità dell'aria non contiene indicazioni relative a quegli aspetti pratici della misura che intervengono nella valutazione del comfort. Le indicazioni fornite in questo capitolo 7 sono dunque solo in parte contenute all'interno della vigente normativa tecnica. In altre parti esse risultano invece originali o sviluppano concetti già apparsi in alcuni convegni di settore (ad esempio Industrial Ventilation 2015).

7.1 Quantità oggetto della misura

Sulla base degli elementi presentati nei capitoli 4, 5 e 6, le sostanze la cui concentrazione va misurata, sono:

- CO₂ (indoor e outdoor);
- HCHO (formaldeide);
- TVOC (composti organici volatili totali);
- NO₂;
- SO₂;
- CO;
- O₃;
- ★ PM_{2.5};
- ★ PM₁₀.

dove l'associazione fra simboli e tipologie di inquinanti è sintetizzata nella tabella 7.1

Simbolo	Tipologia di inquinante
●	Origine antropica
○	Emesso da materiali edilizi e arredi
□	Emesso da sorgenti esterne - gassoso
★	Emesso da sorgenti esterne - particellare

Tabella 7.1 - Tipologie di inquinanti

7.2 Collocazione temporale delle misure

Come per il comfort termo-igrometrico, mutuando un concetto già presente nella legislazione in tema di esposizione professionale a rumore (d.lgs. 81/2008, art. 189 comma 3) e esposizione professionale a vibrazioni (d.lgs. 81/2008, art. 201 comma 2), si raccomanda di eseguire le misure mirate alla valutazione della qualità dell'aria in una situazione di "massimo discomfort ricorrente", ovvero nelle condizioni peggiori fra quelle che si ripetono regolarmente.

Per quanto riguarda le sostanze di origine antropica, gli elementi di cui tener conto sono la densità di soggetti nell'ambiente ed il possibile progressivo accumulo durante la giornata.

Per quanto riguarda le sostanze emesse dai materiali, l'unico elemento di cui va tenuto conto è che il ritmo di rilascio nell'ambiente cresce all'aumentare della temperatura.

Infine, per gli inquinanti di origine esterna, l'elemento prevalente è probabilmente dato dalle condizioni di traffico urbano.

Si considera pertanto rappresentativa del "massimo discomfort ricorrente" una misura eseguita in un pomeriggio feriale caldo, escludendo però i mesi di luglio-agosto nei quali il traffico veicolare è presumibilmente ridotto.

La raccomandazione di eseguire la valutazione in un ambiente tendenzialmente più caldo è ulteriormente supportata dal fatto che la temperatura svolge sicuramente un ruolo rilevante nella percezione della qualità dell'aria da parte dei soggetti, che appunto aumenta, a parità di concentrazione, con la temperatura (Lenzuni et al. 2012). Va comunque chiarito che le attuali metodologie di valutazione della qualità dell'aria stabiliscono limiti basati unicamente sulla concentrazione delle sostanze inquinanti, ignorando di fatto considerazioni legate alla sensibilità percettiva.

L'emissione di tutti i composti organici volatili (formaldeide inclusa) è massima per il materiale nuovo e generalmente decade in modo piuttosto rapido nel tempo, con tempi scala dell'ordine dei mesi. La verifica che la ventilazione sia sufficiente a portare le concentrazioni dei diversi inquinanti al di sotto dei rispettivi valori limite di accettabilità deve quindi articolarsi in due fasi:

- una prima verifica, sul transitorio, va eseguita nell'immediatezza della installazione dei nuovi materiali. Questa verifica darà presumibilmente luogo a valori relativamente elevati che richiederanno un aumento temporaneo della ventilazione;
- Una seconda verifica, sulla situazione a regime, va eseguita a distanza di diversi mesi dalla sostituzione degli arredi.

7.3 Numero e collocazione spaziale delle postazioni di misura

Le postazioni di misura vanno identificate in modo tale che esse risultino rappresentative di tutte le postazioni occupate nella abituale attività lavorativa dei soggetti dei quali si intende valutare il possibile discomfort legato ad insufficiente qualità dell'aria.

In ambienti di grandi dimensioni, dove operano numerosi soggetti (indicativamente da 5 in su), si consiglia di selezionare più di una postazione di misura in modo da riuscire ad evidenziare eventuali disomogeneità nella distribuzione degli inquinanti.

Nel caso di ambienti di dimensioni medio-piccole o comunque dove operano pochi soggetti (indicativamente fino a quattro) una sola postazione di misura risulta

sufficiente. La collocazione di tale postazione va scelta in modo tale da risultare, fra quelle occupate dai soggetti presenti, quella potenzialmente soggetta a minor ventilazione. In pratica va selezionata una postazione lontana dai punti di immissione e di estrazione e presumibilmente distante dal flusso d'aria che si stabilisce fra tali punti.

In analogia con le misure eseguite per la valutazione del comfort termico, le misure vanno eseguite all'altezza della testa, ovvero intorno a 1,7 metri per soggetti in piedi e 1,1 m per soggetti seduti (UNI EN ISO 7726, tabella 5).

7.4 Numero di misure in ciascuna postazione

Non sussistendo la necessità di un'analisi statistica mirata alla stima dell'incertezza, è sufficiente che in ciascuna postazione sia eseguita una sola misura di ciascun inquinante rilevante.

7.5 Durata della misura

Come anticipato al punto 5.2.1 il discomfort, al contrario del rischio, non si determina a seguito di processi cumulativi, ma al contrario si manifesta in tempi brevi. Esso deve pertanto essere identificabile, in linea di principio, già a valle di una misura di breve durata, dell'ordine di qualche minuto.

La concentrazione di CO₂ varia significativamente su scale temporali relativamente brevi (inferiori ad 1 – 2 ore) per diversi motivi. Si raccomanda pertanto di acquisire la storia temporale della concentrazione di questo inquinante per un tempo sufficiente a distinguere se le (eventuali) notevoli concentrazioni risultano determinate da una carente ventilazione (funzionamento difettoso dell'impianto di ventilazione o prolungata chiusura delle finestre) ovvero da una eccezionale presenza di soggetti. L'andamento della concentrazione di CO₂ risulta infatti caratterizzato

- a) nel primo caso da un andamento non particolarmente ripido ma quasi perfettamente rettilineo;
- b) nel secondo caso da un andamento curvilineo ma almeno inizialmente molto ripido.

La misura deve in ogni caso includere i valori più alti della giornata lavorativa. Quindi in sintesi la misura è bene sia eseguita su tempi non inferiori ad 1 ora, ma la valutazione va fatta sulla base della concentrazione massima raggiunta.

L'emissione di formaldeide e degli altri composti organici volatili non varia in modo significativo nel tempo su scale temporali medio-brevi. Tuttavia, anche per questo inquinante si raccomanda di acquisire la storia temporale della concentrazione per un tempo sufficiente a distinguere se le (eventuali) notevoli concentrazioni risultano determinate da una carente ventilazione in presenza di una emissione medio-bassa, ovvero da una forte emissione da parte dei materiali. Valgono

pertanto anche per questi inquinanti le stesse considerazioni fatte in precedenza per la CO₂.

Riguardo agli inquinanti di origine outdoor, la loro concentrazione è sostanzialmente determinata dalla concentrazione nell'aria esterna. Pertanto è sufficiente anche una misura di breve durata, dell'ordine di qualche minuto.

7.6 Sintesi e sequenza operativa

La sequenza operativa per verificare l'accettabilità della qualità dell'aria in un ambiente è la seguente:

- 1) scelta della collocazione spaziale e temporale delle misure;
- 2) individuazione della categoria applicabile (I II III IV) ai fini della valutazione di accettabilità della qualità dell'aria;
- 3) individuazione delle appropriate soglie di accettabilità degli inquinanti di origine indoor antropica, degli inquinanti di origine indoor non antropica, e degli inquinanti di origine outdoor;
- 4) misura della concentrazione di CO₂;
- 5) misura delle concentrazioni degli inquinanti di origine indoor non-antropica (HCHO, TVOC);
- 6) misura delle concentrazioni degli inquinanti di origine outdoor (CO, NO₂, SO₂, O₃, PM_{2.5}, PM₁₀);
- 7) confronto delle concentrazioni misurate con le rispettive soglie di accettabilità:
 - a) se le soglie risultano tutte rispettate, la qualità dell'aria risulta accettabile;
 - b) se almeno una delle soglie risulta superata, occorre individuare ed esplicitare in un documento le opportune azioni correttive.

8. Miglioramento della qualità dell'aria

8.1 Introduzione

Sulla base del già citato punto 1.9.1 dell'Allegato IV del d.lgs. 81/2008, il datore di lavoro deve provvedere a rendere accettabile la qualità dell'aria dell'ambiente di lavoro. Di conseguenza, se nella fase di verifica, una o più delle concentrazioni misurate delle sostanze inquinanti risultano superiori alle rispettive soglie di accettabilità, vanno messi in campo opportuni interventi correttivi.

In linea di principio esistono tre vie per ridurre la concentrazione di un inquinante:

- A. minore immissione mediante interventi sulle sorgenti;
- B. maggior diluizione mediante l'aumento della quantità di aria immessa;
- C. miglioramento dell'efficienza di ventilazione.

In questo quaderno ci limiteremo a discutere soltanto gli interventi di riduzione dell'immissione di inquinanti di origine indoor, sia di origine antropica (8.2) che di origine non antropica (8.3). Qualora, per migliorare la qualità dell'aria, sia necessario intraprendere le vie B e C, modificando gli impianti di ventilazione, sarà compito dei tecnici progettisti stabilire se sono possibili modifiche all'impianto esistente, se esistono le condizioni per installare un nuovo impianto o in ultima analisi ragionare sull'opportunità di cambiare il luogo di lavoro, risultando inadatto quello attuale.

8.2 Inquinanti di origine antropica

8.2.1 Aspetti generali

Nel caso di un inquinante di origine antropica, l'equazione

$$G = G_0 \times n_s \times A \times (M/M_0) \quad (8.1)$$

mostra come il ritmo di immissione nell'ambiente G sia direttamente proporzionale a quattro elementi:

- 1) l'emissione specifica G_0 di un soggetto con attività metabolica M pari all'attività metabolica convenzionale di riferimento $M_0 = 1$ met;
- 2) la densità (per unità di superficie in pianta) di soggetti nell'ambiente n_s ;
- 3) la superficie dell'ambiente A ;
- 4) l'attività metabolica dei soggetti M .

Considerando che l'emissione specifica G_0 e la dimensione dell'ambiente A sono fissate, dall'equazione (8.1) si deduce che gli elementi sui quali è possibile agire per ridurre l'inquinamento di origine antropica sono due:

- riduzione della densità di soggetti per unità di superficie n_s ;

- o cambiamento della destinazione d'uso dell'ambiente con conseguente riduzione dell'attività metabolica M.

Queste due tipologie di intervento saranno discusse rispettivamente nei punti 8.2.2 e 8.2.3.

8.2.2 Riduzione della densità di soggetti

Come si nota nell'equazione (8,2), il ritmo di immissione dell'inquinante nell'ambiente dipende linearmente dal numero di sorgenti. Nel limite in cui si sia raggiunta una condizione stazionaria, per la concentrazione di un inquinante di origine antropica, ad esempio la CO₂, si ha

$$(C_{SS} - C_{out}) = G/Q_e \quad (8.2)$$

dove

C_{SS} è la concentrazione raggiunta nello stato stazionario

C_{out} è la concentrazione esterna

G è il ritmo di immissione dell'inquinante nell'ambiente

Q_e = Q ε_V è la ventilazione efficace

Q è la portata d'aria immessa nell'ambiente

ε_V è l'efficacia della ventilazione

Di conseguenza, una riduzione dell'indice di affollamento da un valore iniziale n₁ ad un valore finale n₂ implica una riduzione della concentrazione di inquinante da un valore iniziale C₁ ad un valore finale C₂ secondo la seguente equazione

$$(C_1 - C_2) = \frac{G_0 A}{Q \varepsilon_V} \frac{M}{M_0} (n_1 - n_2) \quad (8.3a)$$

Invertendo l'equazione (8.3a) e ponendo C₁ = C_{mis} e C₂ = C_{lim}, è possibile calcolare di quanto debba essere ridotto l'indice di affollamento per ricondurre una concentrazione misurata C_{mis} di inquinanti di origine antropica, al di sotto del valore limite di accettabilità C_{lim}, mantenendo invariate tutte le altre quantità rilevanti

$$(n_2 - n_1) = \frac{Q \varepsilon_V M_0}{G_0 A M} (C_{lim} - C_{mis}) \quad (8.3b)$$

8.2.3 Cambiamento della destinazione d'uso

Ragionando in modo perfettamente identico a quanto fatto al punto precedente per la densità di occupanti, si giunge a stabilire che la riduzione dell'attività metabolica da un valore iniziale M₁ ad un valore finale M₂ implica una riduzione della concentrazione di inquinante da un valore iniziale C₁ ad un valore finale C₂ secondo la seguente equazione

$$(C_1 - C_2) = \frac{G_0 A n}{Q \varepsilon_V M_0} (M_1 - M_2) \quad (8.4a)$$

Invertendo l'equazione (8.4a) e ponendo $C_1 = C_{mis}$ e $C_2 = C_{lim}$, è possibile calcolare di quanto debba essere ridotta l'attività metabolica (media degli individui presenti) per ricondurre una concentrazione misurata C_{mis} di inquinanti di origine antropica, al di sotto del valore limite di accettabilità C_{lim} , mantenendo invariate tutte le altre quantità rilevanti

$$(M_2 - M_1) = \frac{Q \varepsilon_V M_0}{G_0 A n} (C_{lim} - C_{mis}) \quad (8.4b)$$

La dipendenza dell'immissione di inquinanti dall'attività metabolica che si osserva nell'equazione 8.1 quantifica il concetto espresso in modo qualitativo dalla vigente legislazione, nella quale si afferma che la quantità sufficiente di aria salubre debba essere calcolata anche *tenendo conto dei metodi di lavoro applicati e degli sforzi fisici imposti* (d.lgs. 81/2008, Allegato IV, punto 1.9.1.1). Come mostrato nella figura 8.1, tratta dalla versione 2016 dello standard ANSI/ASHRAE 62.1 esiste una proporzionalità lineare fra attività metabolica, consumo di ossigeno e produzione di sostanze inquinanti bio-effluenti. Ciò giustifica la dipendenza che si osserva nell'equazione (8.1) dal rapporto fra l'effettiva attività metabolica del soggetto e l'attività metabolica associata ad un lavoro sedentario ($M_0 = 1$ met).

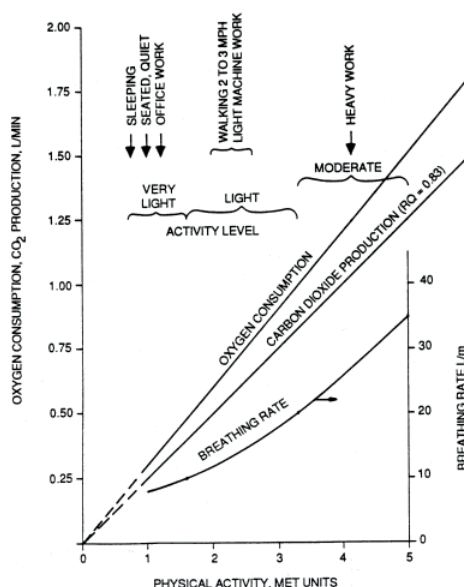


Figura 8.1 - Dipendenza del consumo di ossigeno e della produzione di CO₂ dal tasso metabolico (tratta da ANSI/ASHRAE 62.1:2016)

La misura diretta dell'attività metabolica, per quanto in linea di principio possibile, risulta impraticabile negli ambienti di lavoro. Si ricorre pertanto ad una determinazione indiretta basata su valori tabulati presenti nella normativa tecnica. La vigente versione (2022) della norma tecnica UNI EN ISO 8996, specificamente dedicata alla quantificazione dell'attività metabolica, raggruppa tutte le attività con modesto dispendio metabolico all'interno di un'unica classe (la classe 1), alla quale associa un intervallo di attività metabolica assai ampio (da 125 e 235 W). Risulta pertanto impossibile quantificare la differenza di attività metabolica associata a due attività e di conseguenza questi valori risultano inadeguati nel contesto affrontato in questo capitolo.

Si è pertanto deciso di utilizzare i valori contenuti nella tabella A.1 della precedente versione (2005) della norma tecnica UNI EN ISO 8996, i cui contenuti più rilevanti nel contesto che qui affrontiamo sono stati trasposti nella tabella 8.1. Chiaramente, se l'attività in esame compare nella tabella 8.1, il metabolismo viene stimato direttamente; se al contrario l'attività in esame non compare nella tabella 8.1, il metabolismo viene stimato indirettamente ovvero individuando il valore che corrisponde all'attività più prossima (da un punto di vista energetico) a quella in esame.

Occupazione		Tasso metabolico (W/m ²)
Lavoro d'ufficio	Lavoro sedentario	55 - 70
	Addetto alle pulizie	70 - 100
Lacori artigiani	Muratore	110 - 160
	Pittore	100 - 130
	Panettiere	110 - 140
Occupazioni grafiche	Bibliotecario	75 - 100
Attività varie	Assistente di laboratorio	85 - 100
	Insegnante	85 - 100
	Commesso	100 - 120
	Segretaria	70 - 85

Tabella 8.1 - Tasso metabolico associato ad una serie di attività lavorative (UNI EN ISO 8996:2005, Tabella A.1)

8.3 Inquinanti di origine non antropica

Nel caso di un inquinante emesso dai materiali presenti, l'equazione

$$R_M = R_{M0} \times A \quad (8.5)$$

mostra come il ritmo di immissione nell'ambiente risulti proporzionale a due elementi:

- 1) l'emissione specifica (per unità di superficie in pianta) dei materiali R_{M0} ;

2) la superficie dell'ambiente A.

Dall'equazione (8.5) si deduce che gli interventi possibili per inquinanti generati da materiali consistono nella sostituzione dei materiali esistenti con nuovi materiali edili e di arredo con minor emissività di inquinanti, in modo da abbassare la quantità R_{M0} . L'emissione di inquinanti da parte di materiali edili o di arredo dipende da numerosi fattori, fra i quali:

- il trattamento al quale sono stati sottoposti i materiali nella loro lavorazione;
- l'età degli arredi: l'emissione è sicuramente più intensa nei materiali nuovi, e decade nel tempo;
- la temperatura dell'ambiente: l'emissione cresce con la temperatura.

Alla luce di tali elementi di variabilità è estremamente difficile, per non dire impossibile, fornire stime quantitative generali dei miglioramenti che è possibile attendersi a seguito di interventi di ristrutturazione eseguiti con materiali basso-emissivi.

Categoria	Very low polluting building, LPB-1 I/(s m ²)	Low polluting building, LPB-2 I/(s m ²)	Non low-polluting building, LPB-3 I/(s m ²)
I	0,5	1,0	2,0
II	0,35	0,7	1,4
III	0,2	0,4	0,8
IV	0,15	0,3	0,6

Tabella 8.2 - Soglie di accettabilità per le portate d'aria per unità di superficie Q_s (UNI EN 16798-1, Tabella B.7)

Qualche indicazione riguardo all'impatto di materiali edilizi proviene dalle indicazioni contenute nel Decreto del Ministro della Transizione Ecologica del 23 giugno 2022 (Criteri ambientali minimi per l'affidamento del servizio di progettazione di interventi edilizi, per l'affidamento dei lavori per interventi edilizi e per l'affidamento congiunto di progettazione e lavori per interventi edilizi). Premesso che questo documento si applica esclusivamente all'edilizia pubblica, al punto 2.4.5 esso richiede che, a seguito di qualsiasi ristrutturazione *importante di primo livello* venga garantita almeno la Classe II per la tipologia di edificio "low polluting building", con riferimento alla UNI EN 16798-1. L'analisi della tabella B.7 della UNI EN 16798-1, qui replicata nella tabella 8.2, mostra che l'utilizzo di materiali tali da identificare l'edificio come "low-polluting building" consente una portata d'aria dimezzata rispetto al caso di un edificio "non low-polluting" (presumibilmente il caso di partenza). Considerando che l'inquinamento da materiali si riferisce a sostanze la cui concentrazione outdoor è trascurabile, ciò equivale a stimare un'emissione a sua volta dimezzata. In sintesi, un intervento come quello indicato nel decreto sui criteri ambientali minimi dovrebbe produrre, molto approssimativamente, una concentrazione ambientale finale dimezzata.

9. Strumenti e principi di funzionamento

9.1 Concentrazione di CO₂

La misura della concentrazione ambientale di biossido di carbonio (o anidride carbonica), CO₂, si esegue mediante strumenti che contengono un sensore infrarosso non dispersivo (NDIR, Non Dispersive InfraRed). La tecnica si basa sulla quantificazione dell'assorbimento da parte delle molecole di CO₂ contenute all'interno di un tubo, di radiazione infrarossa con lunghezza d'onda $\lambda = 4.26 \mu\text{m}$. Tale lunghezza d'onda corrisponde al modo "asymmetric CO stretch" delle molecole di CO₂. Tale assorbimento risulta direttamente proporzionale alla concentrazione di CO₂.

La misura risulta più precisa se lo strumento dispone di un sistema di convogliamento dell'aria al proprio interno. Essa può comunque essere eseguita anche in assenza di tale dispositivo, muovendo il sensore o esponendolo ad una semplice forma di circolazione d'aria.

La maggior parte dei misuratori di CO₂ possiede un'accuratezza compresa fra 50 e 100 ppm nell'intervallo di interesse (0 – 3000 ppm). Questa è associata in parte ad un offset, ovvero ad un errore sistematico che si manifesta per qualunque concentrazione di CO₂ ed in parte ad una non linearità del sensore, per cui lo scostamento dal valore reale cresce all'aumentare del valore misurato (Fisk et al. 2006).

Il tempo di risposta (T₉₅) di un misuratore di CO₂ è tipicamente dell'ordine di 1–2 minuti.

Norma tecnica di riferimento: UNI EN ISO 16000-26 12

9.2 Concentrazione di inquinanti emessi da materiali edili e di arredo

La misura delle concentrazioni indoor ambientali di composti organici volatili totali (TVOC) e formaldeide si esegue mediante strumenti che utilizzano un cosiddetto sensore MOS (Metal Oxide Semi-conductor). Questi sensori consistono di un sottile film di particelle di diversi ossidi metallici sulla superficie delle quali, una volta riscaldate a temperature dell'ordine di 200–300°C, verranno catturate particelle di ossigeno che a loro volta reagiscono con i gas dei quali viene misurata la concentrazione. Tali reazioni chimiche determinano un rilascio di elettroni che a sua volta implica un cambiamento nella resistenza elettrica del filo di ossidi metallici che rappresenta la quantità effettivamente misurata. Da questa è immediato risalire alla concentrazione, che risulta direttamente proporzionale al cambiamento della resistenza elettrica.

La maggior parte dei misuratori di TVOC e Formaldeide possiede un'accuratezza dell'ordine del 5% nell'intervallo di interesse (0–1000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$).

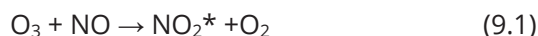
Il tempo di risposta (T_{95}) di un misuratore di TVOC e Formaldeide è tipicamente dell'ordine di qualche decina di secondi.

Norme tecniche di riferimento: UNI EN ISO 16000-5:2007; UNI EN ISO 16000-2:2006.

9.3 Concentrazione di inquinanti di origine outdoor

9.3.1 Monossido e Biossido di azoto

La misura della concentrazione di NO e NO₂ si esegue mediante una tecnica detta chemiluminescenza, cioè una misura di luminescenza in seguito a una reazione chimica. Nella camera di misura entrano contemporaneamente l'aria ambiente ed un flusso di ozono generato a parte dall'analizzatore. Ozono (O₃) e monossido di azoto (NO) reagiscono istantaneamente per produrre biossido di azoto eccitato (indicato con NO₂^{*}):



che successivamente torna nel suo stato fondamentale emettendo un fotone UV (da cui il termine chemiluminescenza con cui viene indicato il metodo):



La radiazione UV emessa per luminescenza viene misurata e da questa si ottiene una stima della concentrazione di NO. Per poter misurare anche la concentrazione di NO₂, l'aria, prima di giungere in camera di misura, viene alternativamente fatta passare attraverso un convertitore catalitico in grado di ridurre l'NO₂ presente in NO. In questo modo si ottiene in camera di misura la concentrazione totale degli ossidi di azoto, NO_x. Dalla differenza tra la concentrazione totale degli NO_x e quella del solo NO si ottiene infine la misura di NO₂.

I sensori di NO₂ soffrono di cross-interferenze da parte dell'ozono. I risultati migliori si ottengono utilizzando un filtro di O₃ integrato. In alternativa è possibile correggere la misura di NO₂ una volta nota, mediante una misura indipendente, la concentrazione di O₃.

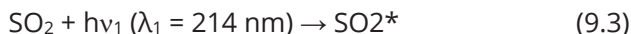
I sensori di NO₂ sono anche particolarmente sensibili alla temperatura ed alla umidità ambientale.

Norma tecnica di riferimento: UNI EN 14211:2012.

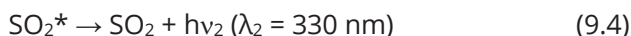
9.3.2 Biossido di zolfo

La misura della concentrazione di biossido di zolfo, SO₂, si esegue sfruttando un processo di fluorescenza ultravioletta. Nella camera di misura, attraversata dal

flusso di aria da analizzare, una lampada UV emette radiazione alla lunghezza d'onda $\lambda = 214 \text{ nm}$. Le molecole di SO_2 assorbono energia, a questa lunghezza d'onda, passando ad uno stato eccitato:



La molecola SO_2^* è fortemente instabile e decade ritornando allo stato fondamentale con emissione di radiazione alla lunghezza d'onda di circa 330 nm (fluorescenza):



La radiazione emessa viene misurata da un detector ed elaborata insieme al segnale registrato in assenza di radiazione eccitante. Si ottiene così la misura della concentrazione di SO_2 .

Norma tecnica di riferimento: UNI EN 14212:2012.

9.3.3 Monossido di carbonio

La misura della concentrazione ambientale di monossido di carbonio (CO) si esegue mediante strumenti che contengono un sensore infrarosso non dispersivo (NDIR, Non Dispersive InfraRed). La tecnica si basa sulla quantificazione dell'assorbimento da parte delle molecole di CO di radiazione infrarossa con lunghezza d'onda $\lambda = 4.67 \text{ }\mu\text{m}$. Tale lunghezza d'onda corrisponde al modo fondamentale di vibrazione della molecola di CO, per cui l'assorbimento risulta direttamente proporzionale alla concentrazione di CO.

Alla medesima lunghezza d'onda assorbono anche altre sostanze assai comuni come l'acqua e l'anidride carbonica. Per eliminare tali interferenze, viene impiegato un dispositivo chiamato "Ruota di correlazione", costituito da una ruota divisa in due mezzelune, una contenente azoto e l'altra una miscela di CO in azoto a concentrazione nota.

Nella camera di misura, facendo girare tale ruota con una certa frequenza, la radiazione IR passa alternativamente nelle due mezze lune arrivando poi al detector. Dalla differenza dei segnali e la successiva elaborazione si ottiene quindi la sola misura del CO mediante la legge di Lambert-Beer, eliminando le interferenze e consentendo inoltre una elevata sensibilità.

Un buon misuratore di CO possiede anche ai livelli più bassi un'accuratezza dell'ordine del 20% ed una concentrazione minima rilevabile di circa 1 ppm (qualche $\mu\text{g}/\text{m}^3$), del tutto compatibile con i valori limite di accettabilità mostrati nella tabella 6.1.

Il tempo di risposta (T_{95}) di un misuratore di CO è di qualche decina di secondi.

Norma tecnica di riferimento: UNI EN 14626:2012.

9.3.4 Ozono

La misura della concentrazione ambientale di ozono si esegue mediante strumenti che utilizzano un sensore UV. La tecnica si basa sulla quantificazione dell'assorbimento, da parte delle molecole di O_3 , di radiazione ultravioletta con lunghezza d'onda $\lambda = 254$ nm. Dall'assorbimento viene poi dedotta la concentrazione mediante la legge di Lambert-Beer.

Un buon misuratore di O_3 possiede un'accuratezza dell'ordine del 10% ed una concentrazione minima rilevabile di qualche $\mu\text{g}/\text{m}^3$, del tutto compatibile con i valori limite di accettabilità mostrati nella tabella 6.1.

Il tempo di risposta (T_{95}) di un misuratore di O_3 è di qualche decina di secondi, ed è possibile eseguire medie su tempi a partire da 1 minuto.

Norma tecnica di riferimento: UNI EN 14625:2012.

9.3.5 $PM_{2.5}$ e PM_{10}

La misura del $PM_{2.5}$ o del PM_{10} si effettua per via gravimetrica a seguito di campionamento del materiale particellare su apposito filtro, in particolare si raccoglie la frazione PM_{10} o la frazione $PM_{2.5}$. Il filtro viene prima condizionato in laboratorio a temperatura ($20 \pm 1^\circ\text{C}$) e umidità controllate ($50 \pm 5\%$).

Parallelamente al metodo di riferimento, per entrambe le frazioni granulometriche, possono essere utilizzati strumenti basati su metodi equivalenti: ad esempio, strumenti che sfruttano il principio della radiazione β da parte della polvere campionata.

Per quanto riguarda gli analizzatori, sono commercialmente disponibili due tipi. Il primo strumento è basato sul metodo di riferimento: raccolta su filtro di opportuna porosità e costituito da diversi materiali (quarzo, fibra di vetro, teflon, esteri di cellulosa, ecc.) dipendente dal tipo di analisi da svolgere, e successiva pesata in laboratorio. Successivamente, dalla conoscenza del volume di aria campionata (misurato in automatico e corretto per temperatura e pressione dallo strumento) e della massa del particolato si calcola la concentrazione di PM_{10} o $PM_{2.5}$ in $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Il secondo strumento invece si basa sul metodo equivalente: sfruttano il principio dell'attenuazione dei raggi beta emessi da una piccola sorgente radioattiva e misurano il particolato, $PM_{2.5}$ o PM_{10} , depositato su filtro singolo. Anche in questo, conoscendo i dati di volume di aria e di massa, si ottiene la concentrazione di PM corrispondente.

Norma tecnica di riferimento: UNI EN 12341:2014.

Bibliografia

Riferimenti legislativi

Legge 16 gennaio 2003, n. 3, Disposizioni ordinarie in materia di pubblica amministrazione

Décret France (2011a), Décret n. 2011-1727 du 2 décembre 2011 relatif aux valeurs-guides pour l'air intérieur pour le formaldéhyde et le benzène. Journal Officiel de la République Française, 4 December 2011.

Décret France (2011b), Décret n. 2011-1728 du 2 décembre 2011 relatif à la surveillance de la qualité de l'air intérieur dans certains établissements recevant du public. Journal Officiel de la République Française, 4 December 2011.

Decreto Legislativo 9 aprile 2008, n. 81, Attuazione dell'articolo 1 della Legge 3 agosto 2007, n. 123 in materia di tutela della salute e della sicurezza nei luoghi di lavoro, G.U. n. 101 del 30 aprile 2008 - Suppl. Ordinario n. 108

Decreto del Presidente della Repubblica 2 aprile 2009, n. 59, Regolamento di attuazione dell'articolo 4, comma 1, lettere a) e b), del decreto legislativo 19 agosto 2005, n. 192, concernente attuazione della direttiva 2002/91/CE sul rendimento energetico in edilizia, G.U. n. 132 del 10 giugno 2009

Decreto Legislativo 13 agosto 2010, n. 155, Attuazione della Direttiva 2008/50/CE relativa alla qualità dell'aria ambiente e per un'aria più pulita in Europa, G.U. n. 216 del 15 settembre 2010

Decreto del Ministero della Transizione Ecologica 23 giugno 2022, Criteri ambientali minimi per l'affidamento del servizio di progettazione di interventi edilizi, per l'affidamento dei lavori per interventi edilizi e per l'affidamento congiunto di progettazione e lavori per interventi edilizi, G.U. n. 183 del 6 agosto 2022

Decreto del Ministero della Transizione Ecologica 23 giugno 2022, Criteri ambientali minimi per l'affidamento del servizio di fornitura, noleggio ed estensione della vita utile di arredi per interni, G.U. n. 184 dell'8 agosto 2022
Ministério Das Obras Públicas, Transportes e Comunicações (2006), Decreto-Lei n. 79/2006 de 4 de Abril. Diário da República, I Série-A n. 67

Riferimenti normativi

Agence Nationale de Sécurité Sanitaire (ANSS) l'alimentation, de l'environnement et du travail (2011), Valeurs Guides de qualité d'Air Intérieur (VGAI). Le Directeur Général Maisons-Alfort, ANSES. Disponibile a <http://www.anses.fr/fr/content/valeurs-guides-de-qualit%C3%A9-d%E2%80%99air-int%C3%A9rieur-vgai>.

ANSI/ASHRAE 62.1-2022, Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality

Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft & Österreichischen Akademie der Wissenschaften - BMLFUW (2006), Richtlinie zur Bewertung der Innenraumluft, erarbeitet vom Arbeitskreis Innenraumluft am Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft und der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, Blau-Weiße Reihe (Loseblattsammlung).

Haut Conseil de la Santé publique (HCSP) (2009), Valeurs Repères D'aide à la gestion dans l'air des espaces clos. Le formaldéhyde, Ministère de la Santé et des Sports: Paris.

Hoge Gezondheidsraad (2017), Indoor air quality in Belgium, HGR: Brussel. Advies nr. 8794. Disponibile a https://www.health.belgium.be/sites/default/files/uploads/fields/fpshealth_theme_file/hgr_8794_advice_iaq.pdf

Innenraumlufthygiene-Kommission and the permanent working group of the Highest State Health Authorities (Arbeitsgemeinschaft der Obersten Landesgesundheitsbehörden, AOLG) (1993), Ad-hoc working group for indoor air guide values, Umwelt Bundesamt. Disponibile a <http://www.umweltbundesamt.de/en/topics/health/commissions-working-groups/ad-hoc-working-group-for-indoor-air-guide-values>

Public Health England (2019), Indoor air quality guidelines for selected Volatile Organic Compounds (VOCs) in the UK. Disponibile a <https://www.gov.uk/government/publications/air-quality-uk-guidelines-for-volatile-organic-compounds-in-indoor-spaces>

RIVM-National Institute for Public Health and the Environment (2007), Health-based guideline values for the indoor environment (Report 609021044/2007), RIVM: Bilthoven, The Netherlands.

UNI EN ISO 7726:2002, Ergonomia degli ambienti termici - Strumenti per la misurazione delle grandezze fisiche

UNI EN ISO 7730:2006, Ergonomia degli ambienti termici - Determinazione analitica e interpretazione del benessere termico mediante il calcolo degli indici PMV e PPD e dei criteri di benessere termico locale

UNI EN ISO 8996:2022, Ergonomia dell'ambiente termico - Determinazione del metabolismo energetico

UNI EN ISO 14626:2012, Qualità dell'aria ambiente - Metodo normalizzato per la misurazione della concentrazione di monossido di carbonio mediante spettroscopia a raggi infrarossi non dispersiva".

UNI EN 12341:2014 Aria ambiente - Metodo gravimetrico di riferimento per la determinazione della concentrazione in massa di particolato sospeso PM10 o PM2,5

UNI EN 14211:2012, Metodo normalizzato per la misurazione della concentrazione di diossido di azoto e monossido di azoto mediante chemiluminescenza

UNI EN 14212:2012 Metodo normalizzato per la misurazione della concentrazione di diossido di zolfo mediante fluorescenza ultravioletta

UNI EN 14625:2012 Metodo normalizzato per la misurazione della concentrazione di ozono mediante fotometria ultravioletta

UNI EN 14626:2012 Metodo normalizzato per la misurazione della concentrazione di monossido di carbonio mediante spettroscopia a raggi infrarossi non dispersiva

UNI EN ISO 16000-2:2006, Aria in ambienti confinati - Parte 2: Strategia di campionamento per la formaldeide

UNI EN ISO 16000-5:2007, Aria in ambienti confinati - Parte 5: Strategia di campionamento per i composti organici volatili (VOC)

UNI EN ISO 16000-26:2012 Aria in ambienti confinati - Parte 26: Strategia di campionamento per l'anidride carbonica (CO₂)

UNI 10339:1995, Impianti aeraulici a fini di benessere. Generalità, classificazione e requisiti. Regole per la richiesta d'offerta, l'offerta, l'ordine e la fornitura.

UNI/TS 11300-1:2008, Prestazioni energetiche degli edifici - Parte 1: Determinazione del fabbisogno di energia termica dell'edificio per la climatizzazione estiva ed invernale

UNI EN 12464-1:2021, Luce e illuminazione - Illuminazione dei posti di lavoro - Parte 1: Posti di lavoro in interni

UNI EN 13030:2005, Ventilazione degli edifici - Terminali d'aria - Prove di prestazione di griglie sottoposte a simulazione di pioggia

UNI EN 13779:2008, Ventilazione degli edifici non residenziali - Requisiti di prestazione per i sistemi di ventilazione e di climatizzazione (ritirata)

UNI EN 15242:2008, Ventilazione degli edifici - Metodi di calcolo per la determinazione delle portate d'aria negli edifici, comprese le infiltrazioni

UNI EN 15251:2008, Criteri per la progettazione dell'ambiente interno e per la valutazione della prestazione energetica degli edifici, in relazione alla qualità dell'aria interna, all'ambiente termico, all'illuminazione e all'acustica (ritirata)

UNI EN ISO 16000-9:2006, Aria in ambienti confinati - Parte 9: Determinazione delle emissioni di composti organici volatili da prodotti da costruzione e da prodotti di finitura - Metodo in camera di prova di emissione

UNI EN 16798-1:2019, Prestazione energetica degli edifici - Ventilazione per gli edifici - Parte 1: Parametri di ingresso dell'ambiente interno per la progettazione e la valutazione della prestazione energetica degli edifici in relazione alla qualità dell'aria interna, all'ambiente termico, all'illuminazione e all'acustica - Modulo M1-6

UNI CEN/TR 16798-2:2020, Prestazioni energetiche degli edifici - Ventilazione per gli edifici - Parte 2: Interpretazione dei requisiti della norma EN 16798-1 - Parametri di input ambientale interno per la progettazione e la valutazione delle prestazioni energetiche degli edifici in relazione alla qualità dell'aria interna, all'ambiente termico, all'illuminazione e all'acustica (Modulo M1-6)

UNI EN 16798-3:2018, Prestazione energetica degli edifici - Ventilazione per gli edifici - Parte 3: Per gli edifici non residenziali - Requisiti prestazionali per i sistemi di ventilazione e di condizionamento degli ambienti (Moduli M5-1, M5-4)

Riferimenti scientifici

<https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/>

Ahola M., Säteri I., Sariola L. (2019), Revised Finnish classification of indoor climate 2018. E3S Web Conf. 111:02017

Allen J. G., MacNaughton P., Satish U., Santanam S., Vallarino J., Spengler J. D. (2016), Associations of Cognitive Function Scores with Carbon Dioxide, Ventilation, and Volatile Organic Compound Exposures in Office Workers: A Controlled Exposure Study of Green and Conventional Office Environments, *Environ Health Perspect* 124(6):805-812

Bonadonna L., Briancesco R., Brunetto B., Coccia A. M., De Gironimo V., Della Libera S., Fuselli S., Gucci P. M. B., Iacovacci P., Lacchetti I., La Rosa G., Meloni P., Paradiso R., Pini C., Semproni M. (2013), Monitoring strategies of biological air pollution in indoor environment. *Rapporti ISTISAN 13/37:72 pp* (Disponibile a http://old.iss.it/binary/publ/cont/13_37_web.pdf)

del Gaudio M., Freda D., Lenzuni P. (2009), La classificazione degli ambienti termici, *Giornale degli igienisti industriali* 34(2), 186-197, 2009

del Gaudio M., Freda D., Lenzuni P. (2010), Proposta di classificazione degli ambienti termici moderati, *Atti del Convegno dBA 2010 "Rischi fisici: valutazione, prevenzione e bonifica negli ambienti di lavoro. A che punto siamo"* (Modena, 6-7 ottobre 2010); 315-326

Emmerich S. J., Persily A. K. (2001), State-of-the-Art Review of CO₂ Demand Controlled Ventilation Technology and Application, National Institute of Standard and Technology, NISTIR 6729, 2001

Fang L., Clausen G., Fanger P. O. (1998), Impact of Temperature and Humidity on the Perception of Indoor Air Quality, *Indoor Air* 8:80-90
Fabianova E., Fletcher T., Koppova K., Hrubá F., Houthuijs D., Antonova T., Volf J., Rudnai P., Zejda J., Niciu E. (2001), On indoor air in Central Europe. 2001. Disponibile a <https://researchonline.lshtm.ac.uk/id/eprint/16961>.

Fisk W. J., Faulkner D., Sullivan D. P. (2006), Accuracy of CO₂ sensors in commercial buildings: a pilot study, *LBNL 61862*, 2006

Fuselli S., Pillozzi A., Santarsiero A., Settimo G., Brini S., Lepore A., de Gennaro G., Liotile A. D., Marzocca A., de Martino A., Mabilia R. (2013a), Monitoring strategies for volatile organic compounds (VOCs) in indoor environments, *Rapporti ISTISAN 13/04:31 pp* (Disponibile a http://old.iss.it/binary/publ/cont/13_4_web.pdf)

Fuselli S., Musmeci L., Pillozzi A., Santarsiero A., Settimo G. (2013b), Proceedings on Indoor air pollution: current situation in Italy. *Rapporti ISTISAN 13/39:85 pp* (Disponibile a http://old.iss.it/binary/publ/cont/13_39_web.pdf)

George K., Ziska L. H., Bunce J. A., Quebedeaux B. (2007), Elevated atmospheric CO₂ concentration and temperature across an urban-rural transect, *Atmospheric Environment* 41 (35), 7654-7665

Gratani L., Varone L. (2005), Daily and seasonal variation of CO₂ in the city of Rome in relationship with the traffic volume, *Atmospheric Environment*, 39 (14), 2619-2624

Kunkel S., Kontonasiou E., Arcipowska A., Mariottini F., Atanasiu B. (2015), Indoor air quality, thermal, comfort and daylight. Buildings Performance Institute Europe (BPIE): Brussels, Belgium. ISBN: 9789491143106

Inail AA.VV. (2018) *La Valutazione del Microclima*, Collana Salute e Sicurezza.

Lenzuni P., Capone P., Freda D. (2012), La qualità dell'aria in ambienti antropizzati - l'effetto dei parametri termo-igrometrici, *Italian Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 3(3), 144-154

Maddalena R., Mendell M. J., Eliseeva K., Chan W. R., Sullivan D. P., Russell M., Satish U., Fisk W. J. (2015), Effects of ventilation rate per person and per floor area on perceived air quality, sick building syndrome symptoms, and decision-making, *Indoor Air* 25(4):362-370

Maula H., Hongisto V., Naatula V., Haapakangas A., Koskela H. (2017), The effect of low ventilation rate with elevated bioeffluent concentration on work performance, perceived indoor air quality, and health symptoms, *Indoor Air* 27(6):1141-1153

Musmeci L., Fuselli S., Bruni B. M., Sala O., Bacci T., Somigliana A. B., Campopiano A., Prandi S., Garofani P., Martinelli C., Cavariani F., D'Orsi F., Marconi A., Trova C. (2015), Monitoring strategies to assess the concentration of airborne asbestos and man-made vitreous fibres in the indoor environment, *Rapporti ISTISAN 15/05:37 pp* (Disponibile a http://old.iss.it/binary/publ/cont/15_5_web.pdf)

Nuccetelli C., Risica S., Onisei S., Leonardi F., Trevisi R. (2017), Natural radioactivity in building materials in the European Union: a database of activity concentrations, radon emanations and radon exhalation rates, *Rapporti ISTISAN 17/36:70 pp* (Disponibile a http://old.iss.it/binary/publ/cont/17_36_web.pdf).

Olesen B. W. (2004), International standards for the indoor environment. *Indoor Air*. 2004, 14, 18-26

Olesen B. W. (2012), Revision of EN 15251: Indoor Environmental Criteria. REHVA J. 2012, August. Available at <https://www.rehva.eu/rehva-journal/chapter/revision-of-en-15251-indoor-environmental-criteria>

Park, J. S., Yoon C. H. (2011) The effects of outdoor air supply rate on work performance during 8-h work period, *Indoor Air* 21(4):284-290

Persily A. K., de Jonge L. (2017), Carbon dioxide generation rates of building occupants, *Indoor Air* 27:868-879

Santarsiero A., Musmeci L., Fuselli S. (2015a), Proceedings on Indoor air quality: current national and European situation. The expertise of the National Working Group on indoor air, *Rapporti ISTISAN 15/04:134 pp* (Disponibile a http://old.iss.it/binary/publ/cont/15_4_web.pdf)

Santarsiero A., Musmeci L., Ricci A., Corasaniti S., Coppa P., Bovesecchi G., Merluzzi R., Fuselli S. (2015b), Microclimate parameters and indoor air pollution, *Rapporti ISTISAN 15/25:62 pp* (Disponibile a http://old.iss.it/binary/publ/cont/15_25_web.pdf)

Seppänen O., Fisk W. J., Lei Q. H. (2006), Ventilation and performance in office work, *Indoor Air* 16: 28-36

Settimo G., D'Alessandro D. (2014), European community guidelines and standards in indoor air quality: what proposals for Italy, *Epidemiologia & Prevenzione* 38:36-41

Settimo G.; Baldassarri, L.T.; Brini, S.; Lepore, A.; Moricci, F.; de Martino, A.; Casto, L.; Musmeci L., Nania M.A., Costamagna F., Marcello I., Fuselli S. (2016a), Presence of CO₂ and H₂S in indoor environments: current knowledge and scientific field literature, *Rapporti ISTISAN 16/15:30 pp* (Disponibile a http://old.iss.it/binary/publ/cont/16_15_web.pdf)

Settimo G., Musmeci L., Marzocca A., Cecinato A., Cattani G., Fuselli S. (2016b), Monitoring strategies to PM₁₀ and PM_{2.5} in indoor environments: characterization of inorganic and organic micropollutants, *Rapporti ISTISAN 16/16:34 pp* (Disponibile a http://old.iss.it/binary/publ/cont/16_16_web.pdf)

Settimo, G.; Bonadonna, L.; Gherardi, M.; di Gregorio, F.; Cecinato, A. (2019), Indoor air quality in healthcare environments: strategies for monitoring chemical and biological pollutants, *Rapporti ISTISAN 19/17:55 pp* (Disponibile a http://old.iss.it/binary/publ/cont/19_17_web.pdf).

Settimo G., Manigrasso M., Avino P. (2020a), Indoor Air Quality: A focus on the European legislation and state-of-the-art research in Italy, *Atmosphere* 11:370

Settimo G., Bonadonna L., Gucci P.M.B., Gherardi M., Cecinato A., Brini S., De Maio F., Lepore A., Giardi G. (2020b), Qualità dell'aria indoor negli ambienti scolastici: strategie di monitoraggio degli inquinanti chimici e biologici, Rapporti ISTISAN 20/3:67 pp. (Disponibile a https://www.iss.it/rapporti-istisan/-/asset_publisher/Ga8fOpve0fNN/content/id/5294927)

Ventilation 2015, Proceedings of the 11th international conference on industrial ventilation, Shanghai, 26 – 28 ottobre 2015

Wargocki P., Wyon D. P., Baik Y. K., Clausen G., Fanger O. (1999), Perceived Air Quality, Sick Building Syndrome (SBS) Symptoms and Productivity in an Office with Two Different Pollution Loads, *Indoor Air* 9:165–179

Wargocki P., Wyon D. P. (2016), Ten questions concerning thermal and indoor air quality effects on the performance of office work and schoolwork, *Building and Environment* 112 (2017) 359-366

Zhang X., Wargocki P., Lian Z., Thyregod C. (2017), Effects of Exposure to Carbon Dioxide and Bioeffluents on Perceived Air Quality, Self-assessed Acute Health Symptoms and Cognitive Performance, *Indoor Air*, 27(1):47-64

Documenti redatti da istituzioni internazionali

European Commission, Joint Research center, Guidelines for Ventilation Requirements in Buildings, European Collaborative Action “Indoor Air Quality and its Impact on Man” (ECA-IAQ), Report N. 11, 1992

European Commission, Joint Research center, Total Volatile Organic Compounds (TVOC) in Indoor Air Quality Investigations, European Collaborative Action “Evaluation of VOC emission from building products” (ECA-IAQ), Report N. 18, 1997

European Commission, Joint Research Center, Total Volatile Organic Compounds (TVOC) in Indoor Air Quality Investigations, European Collaborative Action “Indoor air quality and its impact on man” (ECA-IAQ), Report N. 19, 1997

European Commission, Substance Evaluation Conclusion as required by REACH Article 48, and Evaluation Report for Formaldehyde, 2019

National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH) – Formaldehyde <https://www.cdc.gov/niosh/npgd/npgd0293.html>

National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) – Trends in atmospheric Carbon Dioxide <https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/>

World Health Organization (WHO), Indoor air pollutants exposure and health effects report on a WHO meeting Nördlingen, 8-11 June 1982. (EURO reports and studies; 78). Copenhagen: WHO Regional Office for Europe; 1982

World Health Organization (WHO), Air quality guidelines. Global update 2005. Particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide. Copenhagen: WHO Regional Office for Europe; 2006. http://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0005/78638/E90038.pdf

World Health Organization (WHO), Air quality guidelines – Selected Pollutants, 2010 https://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0009/128169/e94535.pdf

World Health Organization (WHO), Expert Consultation: Available evidence for the future update of the WHO Global Air Quality Guidelines (AQGs), 2016

World Health Organization (WHO), WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide, 2021 <https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/345329/9789240034228-eng.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Appendice A - IAQ e performance

L'impatto della qualità dell'aria sulla performance è noto ormai da diversi decenni. Tali studi hanno inizialmente mirato ad evidenziare una differenza statisticamente significativa fra la performance in assenza ed in presenza di contaminanti. La figura A.1 mostra i risultati ottenuti in uno studio di laboratorio (Wargocki et al. 1999) nel quale è stato indagato l'effetto sulla produttività di lavoratori dell'introduzione di una fonte artificiale di inquinamento indoor. In una operazione semplice di inserimento dati nel PC i lavoratori hanno rallentato l'attività inserendo mediamente il 6,5 % di caratteri in meno. L'analisi dei dati ha fatto supporre che il discomfort dovuto all'introduzione di un oggetto di arredamento che emetteva inquinanti non ha solo aumentato la concentrazione di questi, ma ha anche modificato la percezione degli inquinanti provenienti dall'esterno.

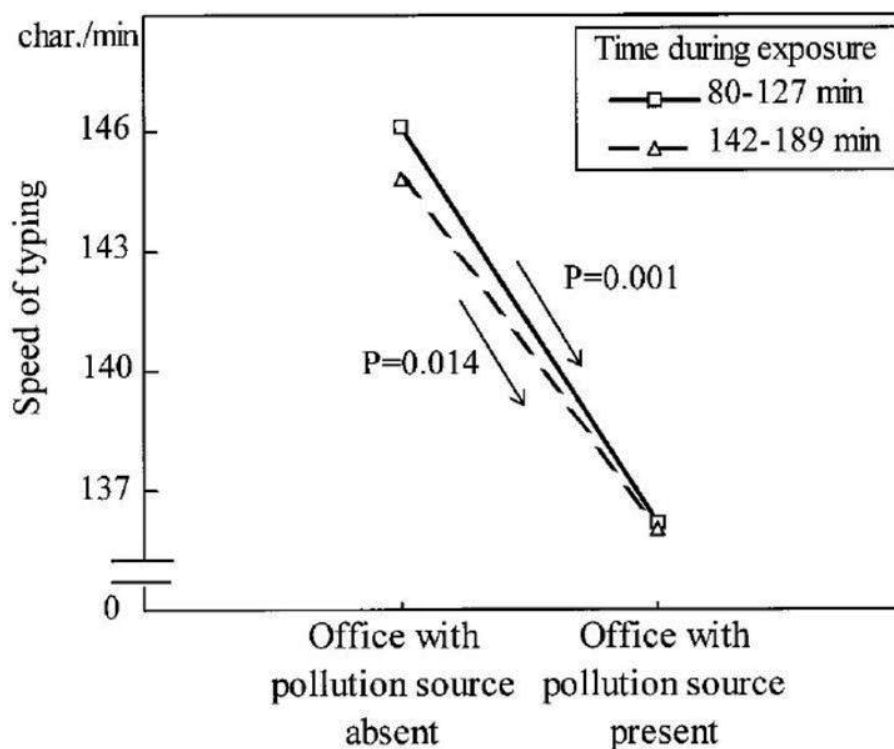


Figura A.1 - Prime indicazioni dell'impatto sulla performance legato alla presenza di contaminanti

Successivamente gli studi hanno tentato di stabilire una relazione quantitativa fra qualità dell'aria e performance. La grande maggioranza di tali studi ha utilizzato come indicatore della qualità dell'aria il flusso d'aria immesso, e non le concentrazioni degli inquinanti. I risultati ottenuti in una numerosa serie di esperimenti condotti fra la fine degli anni '90 e il 2004 sono dettagliatamente discussi sul sito

<https://iaqscience.lbl.gov/ventilation-rates-and-office-work-human-performance> e sono stati sintetizzati nella figura A.2, tratta dalla rassegna di Wargocki e Wyon 2016. Nella figura A.2 la performance è stata normalizzata ad 1 per un flusso d'aria pari a 6,5 l/s per persona. Questo livello di ventilazione corrisponde approssimativamente al limite fissato dalla UNI EN 16798-1 per la categoria II con riferimento alla diluizione dei soli bio-effluenti ovvero degli inquinanti di origine antropica. La stessa norma indica che tale valore va approssimativamente raddoppiato per tener conto di tutti gli inquinanti. Come ci si poteva attendere, flussi d'aria crescenti determinano in media indicatori di performance migliori. L'effetto è più marcato per flussi d'aria di bassa entità, mentre oltre i 30 l/s per persona la curva satura ad un livello che indica un miglioramento della performance intorno al 4% rispetto a quello che si osserva per 6,5 l/s per persona.

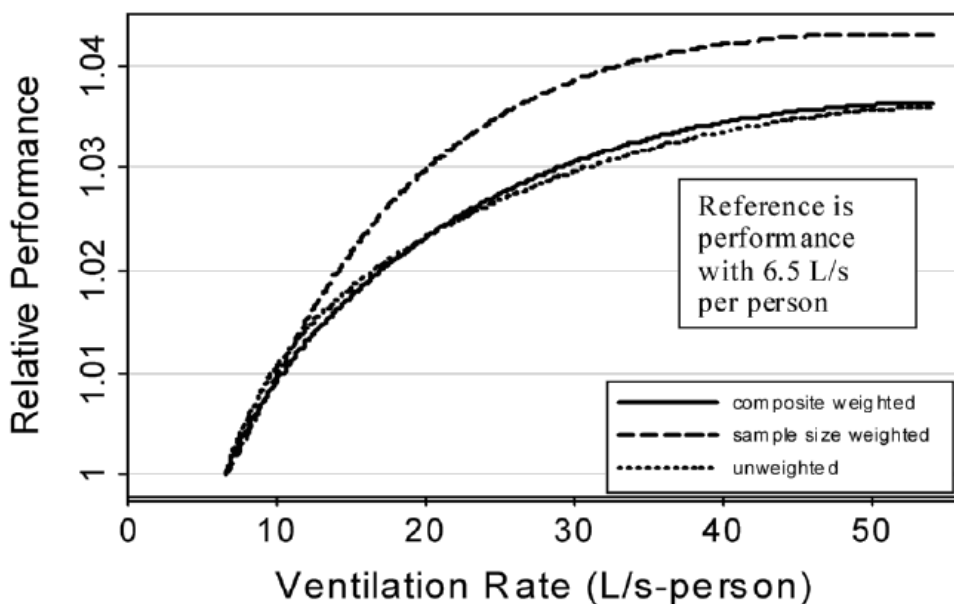


Figura A.2 - Relazione fra performance e flusso d'aria per alti flussi

Informazioni relative a ventilazioni significativamente inferiori a 10 l/s possono essere desunte da alcuni lavori pubblicati negli ultimi dieci anni. La figura A.3 fornisce una sintesi grafica dei risultati raggiunti nei lavori di Park et al. 2011 e di Maddalena et al. 2015. Come nella figura A.2, la performance è normalizzata ad 1 per un flusso d'aria pari a 6,5 l/s per persona.

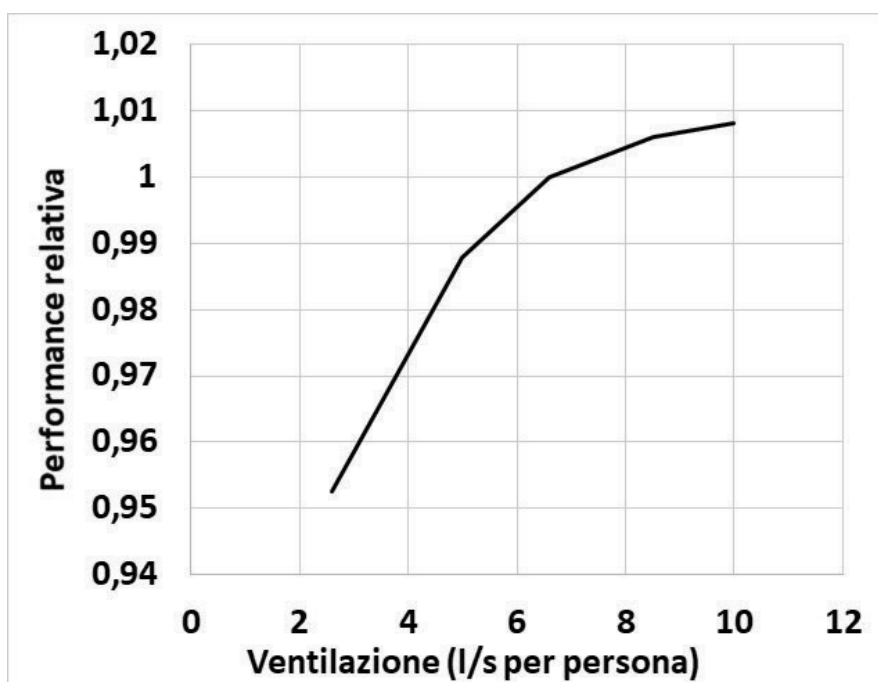


Figura A.3 - Relazione fra performance e flusso d'aria estrapolata a bassi flussi

Si osserva che se i flussi d'aria diventano molto piccoli, la performance cala apprezzabilmente. Va comunque chiarito che esistono altri studi nei quali la diminuzione della performance al diminuire della ventilazione non risulta così evidente. Ad esempio nel lavoro di Maula et al. 2017 le differenze di performance fra due casi con ventilazioni estremamente diverse (caso A 28,2 l/s per persona, caso B 2,3 l/s per persona) sono minime, chiaramente molto più piccole di quello che ci si aspetterebbe dal grafico della figura A.3. Maula et al. ipotizzano che discrepanze di questa dimensione potrebbero essere spiegate dal fatto che a parità di ventilazione la concentrazione di particolari inquinanti odoriferi (es. Formaldeide) sia notevolmente più alta in alcuni esperimenti (es. Park et al. 2011) piuttosto che in altri.

Anche nel contesto della performance si evidenzia pertanto come il descrittore più efficiente sia, più che il flusso d'aria immesso, la concentrazione delle sostanze

odorigene/irritanti. Sfortunatamente non esistono attualmente dati sperimentali sufficienti a quantificare la relazione fra concentrazione di inquinanti e performance, e comunque la possibile contemporanea presenza di diversi inquinanti odorigeni/irritanti complicherebbe molto l'individuazione delle opportune relazioni.

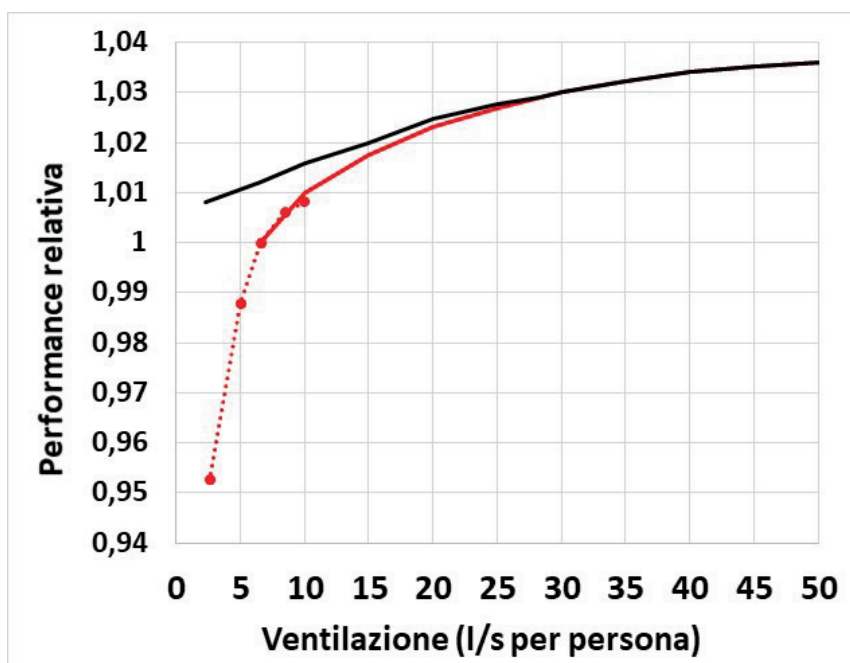


Figura A.4 - Relazioni fra performance e flusso d'aria differenziate per età dei materiali di arredo

Una possibile alternativa consiste nel mantenere il flusso d'aria come descrittore ma distinguendo due casi:

- il caso a) rappresentato dalle curve già mostrate nelle figure A.2 e A.3 e riproposte nella curva inferiore (rossa) nella figura A.4. Questo caso si applica in presenza di materiali di arredo nuovi con probabile significativo rilascio formaldeide e altri composti organici volatili;
- il caso b) rappresentato dalla curva superiore (nera) nella figura A.4. Questo caso si applica in presenza di materiali di arredo già in uso da parecchi anni, la cui emissione di formaldeide e altri composti organici volatili è pertanto presumibilmente modesta.

Appendice B - Verifica del rispetto di un limite sulla portata d'aria mediante misure di CO₂

Nonostante l'approccio prestazionale sia largamente preferibile in termini sia di semplicità sia di accuratezza, non è raro il caso in cui il valutatore si trova di fronte alla richiesta di verificare il rispetto di un limite sulla portata d'aria immessa. La situazione più comune è quella in cui un regolamento comunale di igiene richiama, per quanto concerne il requisito di qualità dell'aria, la UNI 10339. Questo documento indica valori limite di portata d'aria specifica (tipicamente per occupante) per una lunga serie di ambienti con diverse destinazioni d'uso.

Come noto, la norma UNI 10339 ha un focus completamente impiantistico. Tuttavia, il punto 1.9.1 dell'allegato IV del d.lgs. 81/2008 chiarisce in modo inequivocabile che la presenza di un impianto di ventilazione meccanica non è obbligatoria ("..... aria salubre in quantità sufficiente, **anche** ottenuta con impianti di aerazione", punto 1.9.1.1 - "**Se** viene utilizzato un impianto di aerazione", punto 1.9.1.2). Al contrario, è l'assenza di ventilazione naturale ad essere vietata o, per meglio dire, subordinata ad una specifica autorizzazione.

Di conseguenza qualunque requisito venga specificato, espresso come portata d'aria minima ovvero come concentrazione massima di inquinanti, esso può in linea di principio essere ottenuto sia con un sistema RCV sia mediante ventilazione naturale e in pratica andranno considerati entrambi i contributi.

Il problema da affrontare è quindi duplice: da un lato va eseguita una misura della portata d'aria immessa dalla ventilazione meccanica, che non è affatto semplice a causa della difficoltà di procedere ad una misura integrata del flusso partendo da misure locali sulle bocchette di immissione/estrazione; dall'altro va quantificata l'aria immessa naturalmente dalle infiltrazioni, un compito assolutamente proibitivo.

Molto più efficiente è ricavare una stima della portata d'aria complessivamente immessa in un ambiente (ventilazione meccanica + ventilazione naturale) mediante l'esecuzione di una misura di lunga durata di un'inquinante la cui immissione sia nota, in primis la CO₂. L'andamento nel tempo della concentrazione di CO₂ in un ambiente, nell'approssimazione di mixing perfetto, è data da

$$C(t) = C_{out} + \frac{G}{Q_e} \left(1 - e^{-\frac{Q_e t}{V}} \right) \quad (B.1)$$

(Emmerich e Persily 2001). Nell'equazione (B.1):

- C è la concentrazione di CO₂;

- G è il ritmo al quale la CO_2 viene immessa nell'ambiente, pari al prodotto della generazione individuale (a sua volta proporzionale al metabolismo e alla massa dell'individuo) per il numero di individui presenti;
- Q_e è la portata d'aria effettiva, pari al prodotto del flusso d'aria Q immesso in un ambiente per l'efficienza di ventilazione ε_V . In presenza di un'efficienza di ventilazione $\varepsilon_V < 1$, ovvero di mixing imperfetto, la portata d'aria "effettiva" risulta inferiore quella realmente introdotta nell'ambiente. Tuttavia non si tratta di un difetto del metodo, ma di un pregio, perchè la portata d'aria "effettiva" nel punto di misura è la quantità che realmente esegue l'azione diluente degli inquinanti;
- V è il volume ambientale.

Noti G e V , l'equazione (B.1) mette in diretta relazione l'andamento nel tempo di ($C - C_{out}$), ovvero ΔCO_2 , con la portata d'aria effettiva Q_e . Pertanto la ventilazione efficace Q_e può essere ricavata come parametro libero del fit dell'equazione (B.1) ad una serie temporale di misure della concentrazione di CO_2 .

L'equazione (B.1) assume che le tre quantità V , Q_e , G siano costanti nel tempo. Questa assunzione è sicuramente corretta per il volume V , molto probabilmente corretta per la portata d'aria effettiva Q_e , ma potrebbe non esserlo per il numero di soggetti. Se tale numero varia nel tempo, G va calcolato utilizzando la media del numero di soggetti presenti pesata dal periodo di permanenza.

Immagini	
Posizione	Fonte
Copertina	freepik.it
Figura 2.1	Autori
Figura 3.1	Autori
Figura 3.2	Fang, Clausen, Fanger 1998
Figura 3.3	EC 1992
Figura A.1	Wargocki et al. 1999
Figura A.2	Wargocki, Wyon 2016
Figura A.3	Autori
Figura A.4	Autori

INAIL - Direzione centrale pianificazione e comunicazione

Piazzale Giulio Pastore, 6 - 00144 Roma
dcpianificazione-comunicazione@inail.it

www.inail.it

ISBN 978-88-7484-823-2