



RAPPORTI ISTISAN 15|25

ISSN: 1123-3117 (cartaceo) • 2384-8936 (online)

Parametri microclimatici e inquinamento *indoor*

A. Santarsiero, L. Musmeci, A. Ricci, S. Corasaniti,
P. Coppa, G. Bovesecchi, R. Merluzzi, S. Fuselli
per il Gruppo di Studio Nazionale sull'Inquinamento *Indoor*



AMBIENTE
E SALUTE

ISTITUTO SUPERIORE DI SANITÀ

Parametri microclimatici e inquinamento *indoor*

Anna Santarsiero (a), Loredana Musmeci (a),
Annino Ricci (b), Sandra Corasaniti (c), Paolo Coppa (c),
Gianluigi Bovesecchi (c), Riccardo Merluzzi (d), Sergio Fuselli (a)
per il Gruppo di Studio Nazionale sull'Inquinamento *Indoor*

*(a) Dipartimento di Ambiente e Connessa Prevenzione Primaria,
Istituto Superiore di Sanità, Roma*

(b) Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale, Roma

(c) Dipartimento di Ingegneria Industriale, Università degli Studi di Roma "Tor Vergata", Roma

*(d) Dipartimento di Biomedicina e Prevenzione,
Università degli Studi di Roma "Tor Vergata, Roma"*

ISSN 1123-3117

Rapporti ISTISAN
15/25

Istituto Superiore di Sanità

Parametri microclimatici e inquinamento indoor.

Anna Santarsiero, Loredana Musmeci, Annino Ricci, Sandra Corasaniti, Paolo Coppa, Gianluigi Bovesecchi, Riccardo Merluzzi, Sergio Fuselli per il Gruppo di Studio Nazionale sull'Inquinamento Indoor
2015, vii, 62 p. Rapporti ISTISAN 15/25

Il documento riporta un inquadramento dei parametri termo-igrometrici e i componenti/elementi del sistema edilizio di cui tener conto nel monitoraggio dell'aria *indoor* e una sintesi delle relative influenze sugli inquinanti chimici e biologici. Inoltre, viene riportato in Appendice uno schema esemplificativo di organismo edilizio con un elenco non esaustivo di informazioni da prendere in considerazione per programmare il monitoraggio, o da registrare durante il monitoraggio di un ambiente confinato.

Parole chiave: Ambiente confinato; Microclima; Inquinamento aria *indoor*; Edificio; Involucro edilizio; Parametri termoigrometrici

Istituto Superiore di Sanità

Microclimate parameters and indoor air pollution.

Anna Santarsiero, Loredana Musmeci, Annino Ricci, Sandra Corasaniti, Paolo Coppa, Gianluigi Bovesecchi, Riccardo Merluzzi, Sergio Fuselli on behalf of the National Working Group on indoor air
2015, vii, 62 p. Rapporti ISTISAN 15/25 (in Italian)

The document outlines thermo-hygrometric parameters, and factors concerning the building envelope that could significantly influence the chemical and microbiological contaminants in indoor air of enclosed environment. A brief description of the influence of the hygrometric parameters on indoor pollutants is made. An annex reports a scheme of a building system and a non-exhaustive list of information to take into consideration before planning the monitoring and/or to record during the monitoring of an enclosed environment.

Key words: Enclosed environment; Microclimate; Indoor air pollution; Building; Building envelope; Thermo-hygrometric parameters

Per informazioni su questo documento scrivere a: anna.santarsiero@iss.it

Il rapporto è accessibile online dal sito di questo Istituto: www.iss.it.

Citare questo documento come segue:

Santarsiero A, Musmeci L, Ricci A, Corasaniti S, Coppa P, Bovesecchi G, Merluzzi R, Fuselli S per il Gruppo di Studio Nazionale sull'Inquinamento Indoor. *Parametri microclimatici e inquinamento indoor*. Roma: Istituto Superiore di Sanità; 2015. (Rapporti ISTISAN 15/25).

Legale rappresentante dell'Istituto Superiore di Sanità: *Gualtiero Ricciardi*

Registro della Stampa - Tribunale di Roma n. 114 (cartaceo) e n. 115 (online) del 16 maggio 2014

Direttore responsabile della serie: *Paola De Castro*

Redazione: *Paola De Castro* e *Sandra Salinetti*

La responsabilità dei dati scientifici e tecnici è dei singoli autori, che dichiarano di non avere conflitti di interesse.

Il Gruppo di Studio Nazionale sull'Inquinamento *Indoor* dell'ISS è stato costituito con nota del 1° ottobre 2010 (Prot. PRE620/10 COR-M) dal Presidente dell'Istituto Superiore di Sanità.

Di seguito l'elenco dei componenti:

Massimo Berico	<i>Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia e lo sviluppo economico sostenibile</i>
Vincenza Bianchimani	<i>Regione Toscana</i>
Salvatore Bongiorno	<i>Regione Valle d'Aosta</i>
Bruno Bove	<i>Regione Basilicata</i>
Silvia Brini	<i>Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale</i>
Giuseppe Caredda	<i>Regione Sardegna</i>
Angelo Cecinato	<i>Consiglio Nazionale delle Ricerche</i>
Daniela Cimini	<i>Regione Marche</i>
Alessandro Cipriani	<i>Regione Valle d'Aosta</i>
Fabrizio Cumo	<i>Sapienza Università di Roma</i>
Annamaria de Martino	<i>Ministero della Salute</i>
Maria delle Salette Mattiacci	<i>Regione Lazio</i>
Francesco Iacono	<i>Regione Sicilia</i>
Raimondo Ibba	<i>Regione Sardegna</i>
Paolo Izzo	<i>Istituto Superiore di Sanità</i>
Rosanna La Vecchia	<i>Regione Toscana</i>
Rosanna Mabilia	<i>Ministero dell'Istruzione, dell'Università e della Ricerca</i>
Salvatore Minardi	<i>Regione Sicilia</i>
Marinella Natali	<i>Regione Emilia-Romagna</i>
Angelo Pellegrino	<i>Regione Piemonte</i>
Enrico Procopio	<i>Regione Piemonte</i>
Federica Rossi Gasparini	<i>Associazione DonnEuropee Federcasalinghe</i>
Anna Santarsiero	<i>Istituto Superiore di Sanità</i>
Genesio Scaloni	<i>Regione Marche</i>
Gaetano Settimo	<i>Istituto Superiore di Sanità</i>
Luigi Turrio Baldassarri	<i>Istituto Superiore di Sanità</i>
Massimo Valsecchi	<i>Regione Veneto</i>
Antonella Pillozzi	<i>Segreteria Organizzativa, Istituto Superiore di Sanità</i>
Sergio Fuselli	<i>Coordinatore del Gruppo, Istituto Superiore di Sanità</i>

Gruppo *ad hoc* di esperti

Anna Santarsiero	<i>Istituto Superiore di Sanità</i>
Riccardo Merluzzi	<i>Dipartimento di Biomedicina e Prevenzione, Sezione di Medicina del Lavoro, Università di Roma Tor Vergata</i>
Annino Ricci	<i>Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale</i>

INDICE

Nomenclatura	v
Presentazione	vii
Introduzione	1
Inquadramento ambiente <i>indoor</i> e relativo microclima	2
Fattori che influenzano il microclima	6
Umidità	6
Umidità nei componenti edilizi	7
Condensazione del vapor d'acqua nell'aria: termodinamica dell'aria umida.....	8
Condensazione del vapor d'acqua nell'involucro edilizio	12
Temperatura in ambiente <i>indoor</i>	17
Correlazione umidità e temperatura dell'aria <i>indoor/outdoor</i>	19
Aerazione/movimento dell'aria in ambienti <i>indoor</i>	20
Aerazione naturale e distribuzione degli spazi	20
Aerazione naturale e distribuzione orizzontale degli spazi	20
Aerazione naturale e distribuzione verticale degli spazi	23
Aerazione meccanica	28
Omogeneità/stazionarietà dei parametri microclimatici	34
Influenza dell'umidità sugli inquinanti	36
Influenza della temperatura dell'aria sui contaminanti <i>indoor</i>	37
Influenza dell'aerazione/movimenti dell'aria sui contaminanti <i>indoor</i>	38
Monitoraggio dell'aria <i>indoor</i> e dei parametri microclimatici	40
Bibliografia	43
Appendice A	
Metodo del gas tracciante per la misura delle infiltrazioni negli ambienti	51
Appendice B	
Report delle informazioni da registrare prima e/o durante il monitoraggio dell'aria <i>indoor</i> e dei parametri microclimatici	55

NOMENCLATURA

Lettere latine

h	entalpia	$J/(kg\ K)$
$\dot{g}$	portata massica per unità di superficie	$kg/(m^2\ s)$
I	irraggiamento solare	W/m^2
$\dot{m}$	portata massica	kg/s
n	numero di ricambi di volume per ora	s^{-1}
p	pressione	Pa
Q	portata volumica	m^3/h
$\dot{Q}$	potenza termica	W
R	resistenza	$m^2\ s\ Pa/kg$
T	temperatura	$K, ^\circ C$
UR	umidità relativa	$\%$
V	velocità, volume.	$m/s, m^3$
X	umidità assoluta o titolo	g_v/kg_a
x	concentrazione	ppm

Lettere greche

δ	permeabilità	$kg/(m\ s\ Pa)$
Δ	differenza	
ρ	densità	kg/m^3
τ	tempo	s

Pedici

a	aria
d	rugiada
e	esterno
i	interno
inf	infiltrazione
mr	media radiante
p	persona
s	superficie, saturazione
v	vapore
w	bulbo umido

PRESENTAZIONE

In riferimento e in sintonia con gli altri documenti già pubblicati dal Gruppo di Studio Nazionale Inquinamento *Indoor* (GdS) si rammenta che attualmente in Italia non è stata elaborata una specifica regolamentazione legislativa sugli aspetti dell'inquinamento dell'aria per gli ambienti *indoor* (scuole, uffici, abitazioni, mezzi di trasporto, ecc.). Di fatto per detti ambienti si fa riferimento a linee guida o valori di riferimento elaborati dall'Organizzazione Mondiale della Sanità (OMS) e per alcuni inquinanti si fa riferimento a normative di altri Paesi europei, alla letteratura scientifica o ad altri standard quali, ad esempio, quelli relativi all'aria ambiente. Al fine di colmare tale lacuna fu istituito nel 2010 presso l'ISS il GdS composto da esperti dello stesso ISS, dei Ministeri Salute e Istruzione Università e Ricerca (MIUR), di altri Enti e Istituti di Ricerca, di Università e di Regioni. Il GdS nell'ambito dei suoi lavori, ha attivato "gruppi *ad hoc*" che affrontano ed elaborano documenti su specifiche tematiche, condivise nel gruppo allargato e che costituiscono la base per la redazione di rapporti tecnici (Rapporti ISTISAN) sulla problematica *indoor*. A detti gruppi vengono invitati a partecipare di volta in volta anche altri esperti competenti e interessati a contribuire su specifici e peculiari aspetti. Ad oggi il GdS ha elaborato e pubblicato i seguenti documenti:

- “Strategie di monitoraggio dei composti organici volatili (COV) in ambiente *indoor*”. (Rapporti ISTISAN 13/4);
- “Strategie di monitoraggio dell'inquinamento di origine biologica dell'aria in ambiente *indoor*” (Rapporti ISTISAN 13/37);
- “Workshop. Problematiche relative all'inquinamento *indoor*: attuale situazione in Italia. Istituto Superiore di Sanità. Roma, 25 giugno 2012. Atti” (Rapporti ISTISAN 13/39);
- “Workshop. Problematiche relative all'inquinamento *indoor*: attuale situazione in Italia. Istituto Superiore di Sanità. Roma, 28 maggio 2014. Atti” (Rapporti ISTISAN 15/4);
- Strategia di monitoraggio per determinare la concentrazione di fibre d'amianto e fibre artificiali vetrose aerodisperse in ambiente *indoor*”. (Rapporti ISTISAN 15/5);

Nell'ambito delle attività del GdS è emersa anche la necessità di uniformare l'inquadramento dell'ambiente *indoor* in termini di parametri termo-igrometrici e di componenti/elementi dell'involucro edilizio che possono influire sugli inquinanti *indoor*. Ciò sia per una più circostanziata interpretazione/valutazione di risultati di monitoraggio dell'inquinamento *indoor* sia per eventuali misure di screening finalizzate alla scelta delle strategie di indagine. A tal fine è stato attivato un “gruppo *ad hoc*” per l'elaborazione di uno specifico documento su tale aspetti.

Il presente documento riporta un inquadramento dei parametri termo-igrometrici e dei componenti/elementi dell'involucro edilizio di cui tener conto nel monitoraggio dell'aria *indoor*; e un accenno all' influenza dei parametri microclimatici sugli inquinanti chimici e biologici. Infine viene riportata in una appendice un elenco non esaustivo, di informazioni, da registrare prima od in fase di monitoraggio, per un inquadramento più circostanziato dello stato del luogo di misura (ambiente confinato) come facente parte di un organismo edilizio.

Loredana Musmeci
Direttore del Dipartimento Ambiente
e Connessa Prevenzione Primaria

Sergio Fuselli
Coordinatore del GdS

INTRODUZIONE

In questo documento vengono forniti alcuni elementi per un inquadramento più circostanziato dell'ambiente *indoor* dal punto di vista dei parametri microclimatici e dei componenti degli impianti/elementi dell'involucro edilizio che determinano il microclima dell'ambiente *indoor* e influenzano la presenza di contaminanti chimici e biologici nell'aria *indoor*.

Tali elementi possono essere di supporto sia alle strategie di monitoraggio che di interpretazione dei risultati di analisi dei contaminanti chimici e biologici dell'aria *indoor*.

Per "ambienti *indoor*" si intendono gli ambienti confinati di vita e di lavoro non industriali (per quelli industriali vige una specifica normativa), e in particolare, quelli adibiti a dimora, svago, lavoro e trasporto, quali:

- abitazioni;
- uffici pubblici e privati;
- strutture comunitarie (ospedali, scuole, caserme, alberghi, banche, ecc.);
- locali destinati ad attività ricreative e/o sociali (cinema, bar, ristoranti, negozi, strutture sportive, ecc.);
- mezzi di trasporto pubblici e/o privati (auto, treno, aereo, nave, ecc.).

In questo documento per "microclima" si intende il clima locale di un ambiente confinato specifico, o parte di esso, definito dall'insieme dei parametri ambientali di natura fisica (parametri microclimatici), dalle loro distribuzioni nelle tre dimensioni spaziali e dalla loro evoluzione temporale. In assenza di sistemi di controllo artificiale dell'ambiente (condizionamento aria, impianti di riscaldamento ecc.), il microclima è determinato dall'interazione tra oggetti, pareti/involucro edilizio e ambiente esterno. In presenza di controllo ambientale artificiale, il microclima è determinato dalle condizioni di esercizio degli impianti. I parametri microclimatici più usuali che nel loro insieme caratterizzano il microclima, o alcuni aspetti di esso sono: temperatura dell'aria, umidità relativa, umidità assoluta (titolo), velocità dell'aria e ricambi di aria.

L'aria *indoor* è un sistema molto complesso. Esso è influenzato da numerosi fattori (ambiente esterno, condizioni meteorologiche, struttura e costruzione dell'ambiente confinato, distribuzione degli spazi interni, stile di vita e attività degli occupanti, impianti di riscaldamento, condizionamento ecc.). La numerosità dei fattori coinvolti non consente di quantificare l'influenza e la relativa importanza di ciascuno di essi. Tuttavia il loro effetto globale si riflette sulla qualità dell'aria *indoor* in termini di concentrazioni di contaminanti chimici e microbiologici. Informazioni sui contaminanti *indoor* sono di fatto contenute nei valori che i parametri microclimatici (1-2) assumono prima e durante (3-8) il monitoraggio/campionamento dei contaminanti. In definitiva lo scopo di questo documento è di fornire un inquadramento dell'ambiente *indoor* sia per una più circostanziata interpretazione/valutazione di risultati di monitoraggio dell'inquinamento *indoor* sia per eventuali misure di screening finalizzate alla scelta della più appropriata strategia di indagine. Pertanto, per l'esecuzione delle misure dei parametri microclimatici si rimanda alle norme tecniche pertinenti vigenti ivi comprese quelle concernenti l'ergonomia degli ambienti termici e gli strumenti per la misurazione delle grandezze fisiche (9), la conservazione dei beni culturali con relative procedure e strumenti per misurare l'umidità dell'aria e gli scambi di vapore tra aria e beni culturali (10-11).

INQUADRAMENTO AMBIENTE *INDOOR* E RELATIVO MICROCLIMA

Per gli scopi di questo documento si richiama la definizione di “microclima” adottata nell’Accordo tra il Ministro della Salute, le Regioni e le Province Autonome (“Linee guida per la tutela e la promozione della salute negli ambienti confinati”) (12):

“complesso dei parametri ambientali che condizionano lo scambio termico soggetto-ambiente”;

e quella adottata dall’Accordo del 18-11-2010 n. 124, emanato dalla Conferenza Unificata, ai sensi dell’articolo 9 del decreto legislativo 27 agosto 1997, n. 281, tra Governo, regioni, province autonome di Trento e Bolzano, Province, Comuni e Comunità montane concernente le linee di indirizzo per la prevenzione nelle scuole dei fattori di rischio *indoor* per allergie e asma (13):

“l’insieme delle condizioni ambientali, riferite ad un ambiente confinato, determinate da temperatura, umidità, irraggiamento, ventilazione, in grado di influire sul benessere termico dell’individuo che lavora in quell’ambiente”.

Si fa presente inoltre che il Decreto legislativo 81/2008, normativa sulla tutela della salute e sicurezza dei lavoratori, classifica nel Titolo VIII (art. 180) il microclima tra gli agenti fisici che, ai sensi dell’art. 181, devono essere compresi nella valutazione dei rischi.

Ai fini di un inquadramento dei fattori che influenzano il microclima di un ambiente *indoor*, è da considerare che l’ambiente *indoor* (confinato) è una porzione di spazio materiale separato dall’ambiente esterno mediante una superficie di controllo/confine (pareti/involucro edilizio) che consente scambi termici e di massa (aria, vapore acqueo) con l’ambiente esterno, si aggiunga inoltre che gli scambi termici avvengono anche tra ambiente e oggetti presenti nell’ambiente stesso e tra ambiente e persone che occupano l’ambiente. Infatti si definisce “microclima” il complesso dei parametri fisici ambientali che caratterizzano l’ambiente locale e che, insieme a parametri individuali quali l’attività metabolica e l’abbigliamento, determinano gli scambi termici fra l’ambiente stesso e gli individui che vi operano all’interno.

La superficie di confine (pareti/involucro edilizio) infatti è caratterizzata schematicamente da due parametri fondamentali, la permeabilità (14-16) che dipende dalla porosità dei materiali (17-18), e la conduttività termica dei materiali (19-23) che incidono sugli scambi termoigrometrici.

La Figura 1 riporta uno schema dei flussi termici coinvolti in un sistema edificio e la strategia di controllo con cui l’impianto opera per compensarli.

Il microclima *indoor* è condizionato da molti di fattori, quali:

- il clima *outdoor* con le sue variazioni (temperatura, umidità, irraggiamento solare, vento, ecc.) di breve, medio e lungo termine;
- le caratteristiche dell’ambiente esterno in grado di influenzare le interazioni dirette tra parametri microclimatici e climatici (barriere al vento, effetti canyon, ombreggiamenti, specchi d’acque superficiali, ecc.);
- le caratteristiche tecnologiche e costruttive dell’ambiente in esame (architettura, materiali e prodotti impiegati, impianti di controllo del microclima, ecc.);
- l’uso degli ambienti e le abitudini di vita /stili di vita degli occupanti;
- gli scambi termici, di aria e di acqua (vapore/aerosol, umidità) che avvengono con l’esterno;
- gli scambi termici e di acqua (vapore/aerosol, umidità) tra l’ambiente interno e gli elementi ivi presenti.

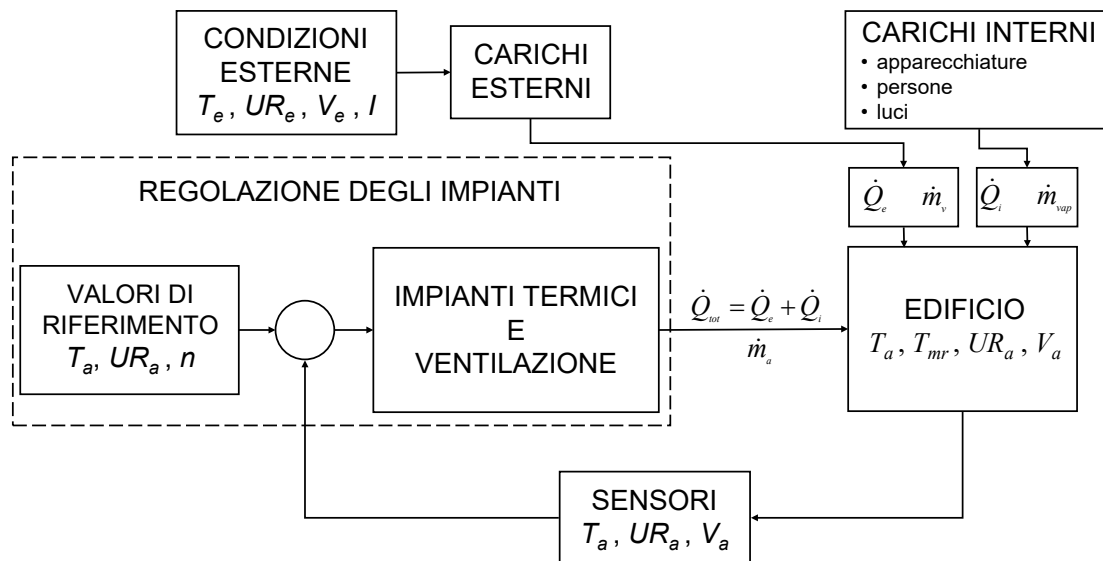


Figura1. Flussi termici in un sistema edificio e sistema di controllo effettuato dall'impianto termico e di ventilazione

Come da norme tecniche vigenti, il fabbisogno energetico (19, 24-36) di un edificio è determinato dai seguenti elementi:

- dati climatici orari “dell’anno tipo della zona”;
- i descrittori dell’involucro dell’edificio incluso i ponti termici (area e geometria, orientamento, esposizione, condizioni al contorno, parametri termofisici, proprietà ottiche solari delle superfici vetrate e le zone esterne d’ombra;
- i profili orari della temperatura interna stabilita/necessaria;
- i profili orari della ventilazione e delle infiltrazioni d’aria;
- i profili orari dei flussi termici convettivi e radiativi dovuti all’illuminazione, agli occupanti e alle apparecchiature presenti nell’ambiente;
- le caratteristiche degli impianti di riscaldamento e/o raffreddamento.

Gli scambi termici e le modalità con cui questi avvengono caratterizzano dal punto di vista termico l’ambiente *indoor*. In particolare gli scambi sono governati dai tre classici meccanismi: convezione, conduzione e irraggiamento.

In ambiente *indoor* gli scambi per convezione consistono nel riscaldamento/raffreddamento dell’aria per contatto con le superfici calde/fredde a causa della stessa differenza di temperatura tra aria e superfici (convezione naturale) o del movimento dell’aria prodotto da dispositivi (ventilazione forzata). Si consideri inoltre che l’aria immessa nell’ambiente si trova in genere ad una temperatura differente rispetto all’aria *indoor*.

Le superfici calde/fredde sono generalmente rappresentate dalle chiusure perimetrali dell’ambiente, da porzioni di apparati per il trattamento termico dell’aria, da impianti, macchinari e attrezzature. Esse in base alla funzione svolta (ad esempio radiatori, involucri di forni, serpentine di frigoriferi, pentole sui fornelli, ecc.) o per perdite di energia sotto forma termica (distribuzione acqua calda, lampade alogene, motori elettrici, ecc.) o per irraggiamento solare diretto presentano temperature superficiali diverse rispetto all’aria o alle altre superfici presenti.

Lo scambio termico per conduzione avviene in un mezzo (solido, liquido o aeriforme) quando viene trasmesso calore senza movimento di materia. Il fenomeno dipende dalle

caratteristiche geometriche del corpo, dalla conduttività termica dei materiali e dalle differenze delle temperature in gioco.

Lo scambio termico per irraggiamento avviene attraverso l'emissione, l'assorbimento e la trasmissione di radiazione elettromagnetica. Avviene tra superfici a diverse temperature, per effetto delle radiazioni solari e della trasparenza di parti dell'involucro edilizio (tipicamente le superfici vetrate) alle radiazioni termiche.

Gli scambi termici possono essere influenzati anche dalla presenza di vapore d'acqua nell'aria o dalla presenza di acqua nell'ambiente attraverso i fenomeni di evaporazione/condensazione.

Per quanto sopra si usa caratterizzare il "microclima" di un ambiente attraverso parametri che rappresentino l'energia termica scambiata, la movimentazione dell'aria e la quantità di acqua presente in aria.

Sotto l'aspetto termo-igrometrico e per gli scopi di questo documento i parametri variabili nel tempo e nello spazio, che influenzano il microclima di un ambiente *indoor* sono:

- temperatura dell'aria (T_a);
- temperatura media radiante (T_{mr});
- umidità relativa (UR);
- velocità dell'aria (V_{aria} , Ricambi di aria/Flussi di aria).

Per la definizione e misurazione di ciascun parametro si rimanda alle norme pertinenti ad esempio la norma UNI EN ISO 7726 (9-11), la UNI EN ISO 13731(37) ecc..

Per quanto attiene la qualità dell'aria, sono da prendere in considerazione le tipologie di inquinanti sia chimici che biologici generate da ben individuabili sorgenti *indoor/outdoor* (3-8, 38) e possibili sorgenti che originano a causa di determinati e/o combinazioni di valori di temperatura dell'aria, temperatura media radiante, temperature superficiali, umidità relativa, velocità e ricambi di aria, che danno luogo alla *indoor chemistry* (3-8, 38-49): contaminanti da individuate sorgenti *indoor/outdoor* possono reagire l'uno con l'altro o tra di loro dando luogo a prodotti (di reazione) altrimenti assenti in quanto non generati direttamente dalle sorgenti *indoor/outdoor* presenti nell'ambiente di indagine.

Infatti, determinate combinazioni di ricambi di aria, di valori di UR , di temperatura dell'aria *indoor* e/o delle superfici presenti nell'ambiente confinato inducono delle reazioni chimiche che possono avvenire:

- nel materiale;
- sulla superficie del materiale;
- nella fase gas.

La *indoor chemistry* comprende in generale le seguenti reazioni:

- ossidazione: favorita per esempio dalla presenza di ozono;
- idrolisi: che si genera in generale dalla copresenza di umidità e alcalinità delle superfici presenti nell'ambiente confinato;
- reazioni in fase gas: favorite da basse velocità/ricambi di aria che aumentano il tempo di permanenza degli inquinanti *indoor* nell'ambiente ;
- reazioni eterogenee: per esempio la presenza di superfici polverose o rugose aumenta la superficie reale di reazione, soprattutto se le particelle e le polveri accumulate sono igroscopiche;
- emissioni primarie e secondarie dei costituenti chimici dei materiali: emissione di alcuni composti chimici coinvolti nei processi di produzione dei materiali, presenti e/o utilizzati (vedi i materiali in uso nell'*indoor* quali: arredi, materiali da costruzione ecc.) nell'ambiente confinato, favorite da temperature elevate che aumentano la velocità alla quale avvengono la maggior parte delle reazioni chimiche.

La Figura 2 riporta ad esempio uno schema delle emissioni primarie e secondarie dei materiali presenti nell'*indoor* (arredi, materiali da costruzione, ecc.).

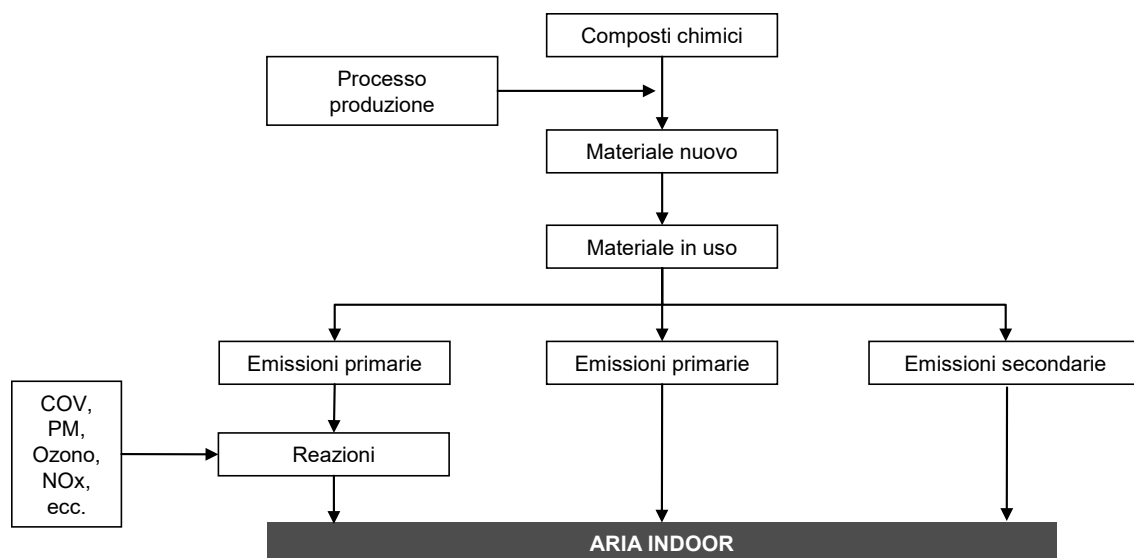


Figura 2. Schema delle emissioni primarie e secondarie dei materiali presenti nell'*indoor* (arredi; materiali da costruzione ecc.)

FATTORI CHE INFLUENZANO IL MICROCLIMA

Come già detto i fattori che influenzano il microclima e quindi gli inquinanti sono:

- umidità relativa (UR);
- temperatura dell'aria (T_a),
- temperatura delle superfici (T_s) e temperatura media radiante (T_{mr});
- velocità dell'aria (V_a) e il ricambio di aria naturale o forzato;

e qui di seguito si riporta per ciascuno di essi una breve descrizione.

Umidità

Le sorgenti di immissione di umidità (50) possono essere di origine:

- *naturale*: pioggia, umidità del suolo, falde e vene acquifere, ghiaccio e neve fondenti, superfici di specchi d'acqua;
- *artificiale*: guasti in condutture di adduzione acqua e di smaltimento reflui, processi industriali limitrofi, sistemi di riscaldamento e raffrescamento, trattamento dell'aria.

Le provenienze dell'umidità più persistenti e frequenti sono:

- *meteorica*, dovuta all'acqua piovana che bagnando la parete esterna penetra nella muratura anche per tutto il suo spessore;
- *da condensazione*, dovuta a differenze di temperatura tra aria (miscela aria/vapor d'acqua) e le superfici di contatto, più fredde, dove avviene la condensazione, per effetto anche della diversa conduttività termica e della porosità dei materiali; si può avere condensazione anche per la presenza di tubazioni sottotraccia;
- *da infiltrazione*, dovuta a cause impreviste (rotture di tubazioni, fognature, ecc.);
- *da risalita* (o ascendente), proveniente dal terreno (tipicamente falde freatiche) che risale nelle murature per capillarità.

Le prime tre sono legate ad eventi stagionali e straordinari. L'umidità da risalita capillare è invece un fenomeno che si manifesta durante tutto il corso dell'anno.

Le sorgenti *indoor* di umidità sono per lo più imputabili a:

- presenza di persone, animali e piante (respirazione/traspirazione), di vasche e sifoni a pelo d'acqua libero, di piscine, fontane, lavatoi;
- attività delle persone occupanti l'ambiente: cottura (sia per combustione sia per evaporazione), lavaggio e asciugatura indumenti e stoviglie, bagni e docce, pulizia degli ambienti, inaffiamento;
- umidità proveniente dai materiali da costruzione: evaporazione di acqua residua presente nelle strutture e nei materiali durante i lavori di costruzione, ristrutturazione o manutenzione.

La presenza di persone e relativa attività può influire, in funzione della densità di affollamento delle persone e dell'attività svolta, sulla quantità di umidità nell'aria *indoor*.

Ad esempio, l'apporto di umidità, tramite l'evaporazione del sudore e il vapore d'acqua emesso con la respirazione incrementa l'umidità relativa anche di 10 punti percentuali, in caso di notevoli densità di persone e con rispettivi sforzi fisici elevati, come ad esempio nelle palestre al chiuso). La Tabella 1 riporta alcuni esempi di quantità oraria di vapore acqueo prodotto durante lo svolgimento di alcune attività.

Tabella 1. Quantità oraria di vapore acqueo prodotto nello svolgimento di alcune attività

Attività	Vapore acqueo prodotto
Sonno – attività leggera (g/h persona)	30-60
Seduto in ufficio o abitazione – attività media (g/h persona)	80
Sala da ballo – danza moderata (g/h persona)	230
Asciugatura del bucato (g/h)	50-200
Cucina (g/h)	600-1500
Doccia (g/h)	2600

Alcuni esempi di significativa incidenza sull'umidità, in assenza di ricambi di aria, sono i seguenti:

- in condizioni estreme con la sola sudorazione una singola persona può immettere anche 500 g/h di acqua;
- una stanza di circa 200 m³, con temperatura dell'aria di circa 20°C, UR 50%, con la presenza di 10 persone che svolgono un'attività leggera per 2 ore, può raggiungere una UR pari al 100%; analogo valore di umidità relativa si raggiunge se si è in presenza di una pentola in ebollizione per circa 45 minuti.

Umidità nei componenti edilizi

La presenza dell'acqua in forma liquida nei componenti edilizi può essere dovuta alle perdite da condutture o da contenitori, al contatto diretto con acqua o terreni o altro materiale particolarmente ricco di acqua, alla condensazione del vapore d'acqua dell'aria ambiente (tale condensazione è dovuta a differenze di temperatura tra aria e le superfici con cui è in contatto).

In definitiva, l'umidità nei componenti edilizi può essere originata da:

- umidità meteorica (infiltrazioni da copertura, serramenti, murature, ecc.);
- umidità accidentale (perdite, allagamenti);
- umidità ascendente o da risalita capillare dal terreno;
- umidità di costruzione;
- umidità di condensazione (superficiale o interstiziale).

L'umidità causata da acqua meteorica si manifesta nelle mansarde e nei sottotetti, dove le macchie si presentano nel soffitto o vicino alla grondaia e, se l'acqua è penetrata più abbondantemente, anche lungo le pareti (e può interessare anche il piano sottostanti). Spesso l'acqua entra nella parte più alta vicino al colmo del tetto a causa dello spostamento dei coppi per effetto del vento o della neve, oppure per intasamento della grondaia o discontinuità dell'impermeabilizzazione del tetto. Nei locali all'ultimo piano in edifici con tetto piano in cemento armato, le cause principali di formazione di macchie, aloni di umidità, che normalmente si trovano vicino i muri perimetrali, derivano da una scarsa impermeabilizzazione del terrazzo, dall'intasamento o dalla rottura di un pluviale.

L'umidità ascendente interessa in generale i muri prospicienti le fondazioni. Nel caso si diagnostichi questo tipo di umidità, bisognerà verificare se l'acqua che risale i muri per capillarità, può provenire da fonti inesauribili (es. falde freatiche), oppure da ristagni di acqua piovana o da perdite di reti idriche. Il degrado lasciato da queste fonti è generalmente rilevante, distribuito omogeneamente, con poche variazioni nel tempo. In alcuni casi l'umidità viene trasmessa lateralmente, dal terreno sul quale la parete è appoggiata (cosiddetta muratura controterra); anche in tale caso l'acqua, dopo aver penetrato il muro lateralmente, risale per via capillare. Tale umidità provoca un processo di disfacimento degli intonaci e delle malte che legano la muratura, ed è causa frequente del degrado degli edifici,

L'umidità da infiltrazione è causata dalla rottura delle tubazioni di impianti idraulici (come il carico e scarico dell'acqua, il riscaldamento e il condizionamento e i pluviali incassati nella muratura) o da falde acquifere.

L'umidità da costruzione deriva dal rilascio di acqua usata nel processo di costruzione o già presente nei materiali prima del loro impiego.

L'umidità da condensazione del vapor d'acqua è dovuta a fenomeni di condensazione superficiale e interstiziale connessi, rispettivamente, alla presenza di superfici "fredde" e alla diffusione del vapore attraverso la parete; in particolare, si ha formazione di condensa sulla superficie interna e/o esterna dei componenti edilizi, quando la temperatura superficiale scende al di sotto della temperatura di rugiada. Le cause risultano quindi la temperatura e l'umidità relativa ambientali e della superficie interessata. Invece si ha condensazione interstiziale in un componente edilizio posto fra due ambienti quando il vapore acqueo che lo attraversa condensa all'interfaccia fra due strati oppure all'interno dei pori dei materiali costituenti gli strati del componente edilizio stesso. Le cause sono la differenza di pressione parziale del vapore, dovuta a sua volta dalla differenza di temperatura fra i due ambienti (interno/esterno o interno/interno) separati dal componente edilizio considerato, mentre i parametri che intervengono nel regolare il fenomeno sono le resistenze termiche e la permeabilità al vapore di ogni strato.

La condensazione è influenzata da:

- umidità dell'aria;
- temperatura e ventilazione dei locali;
- tipo di materiali che costituiscono la struttura;
- finiture superficiali.

Per una migliore comprensione del fenomeno della condensazione si rimanda ai paragrafi successivi.

Condensazione del vapor d'acqua nell'aria: termodinamica dell'aria umida

Per una comprensione della condensazione del vapore d'acqua contenuto nell'aria qui di seguito si riportano alcuni cenni sulla termodinamica dell'aria umida e relative trasformazioni termodinamiche, rimandando alla teoria la trattazione completa (51).

L'aria umida è considerata con una certa approssimazione una miscela di due gas ideali: l'aria secca e il vapore d'acqua, il cui contenuto varia in funzione delle condizioni termodinamiche della miscela stessa.

Si può pertanto scrivere per la miscela aria secca-vapore d'acqua la relazione di Dalton:

$$p = p_a + p_v$$

dove:

- p_a pressione parziale dell'aria secca;
- p_v pressione parziale del vapore;
- p pressione totale.

Le grandezze che individuano lo stato termodinamico dell'aria umida sono le seguenti.

– Umidità relativa (UR)

è il rapporto percentuale tra la pressione parziale del vapore (p_v) e la pressione di saturazione del vapore d'acqua (p_s) nell'aria valutate alla stessa temperatura. La condizione di aria satura è tale che una qualsiasi immissione di acqua vapore nella miscela non produce evaporazione, e l'immissione di vapore produce condensazione con formazione di acqua liquida.

- *Temperatura dell'aria/Temperatura di bulbo secco (T_a)*
è la temperatura dell'aria dell'ambiente di misura rilevata con un termometro a bulbo secco. Il valore della misura è indipendente dall'umidità relativa nell'ambiente.
- *Temperatura a bulbo umido (T_w)*
è la temperatura indicata da uno psicrometro quando il bulbo di un termometro è coperto con una garza impregnata di acqua sulla quale si realizza una circolazione forzata di aria alla velocità di circa 4,5 m/s fino al raggiungimento di una temperatura di equilibrio. Il calore di vaporizzazione è fornito dal calore sensibile dell'aria. Il flusso termico per il cambiamento di fase è compensato dal raffreddamento del bulbo. Dopo il contatto con il bulbo l'aria si presenta satura e a temperatura inferiore; si può ritenere, con buona approssimazione, che tale temperatura, a bulbo umido T_w , coincida con la temperatura dell'aria satura a eguale valore di entalpia.
- *Temperatura di rugiada (T_d)*
è la temperatura alla quale l'aria umida diventa satura (umidità relativa del 100%) quando è raffreddata a pressione costante (raffreddamento isobaro) e a titolo costante (se il raffreddamento continua al di sotto della T_d si ha la condensazione del vapore).
- *Umidità assoluta dell'aria umida/titolo dell'aria umida (X)*
rapporto tra la massa di vapore d'acqua in un campione di aria ambiente e la massa di aria secca contenuta nello stesso campione. L'umidità assoluta di solito è espressa in grammi di vapore per kg di aria secca (g_v/kg_a).
- *Entalpia dell'aria umida (h)*
rimandando alla teoria per la trattazione completa, nell'ipotesi di miscela ideale, l'entalpia, espressa in J/kg_a (joule per unità di massa di aria secca) può essere espressa come somma dell'entalpia parziale dell'aria secca e del vapore acqueo.

Un riferimento per la definizione delle grandezze in gioco è dato dalla norma UNI EN ISO 13731 che riporta anche una guida con procedure e strumentazione di misura dell' UR in aria, sia in ambienti confinati che all'esterno dalla UNI EN 16242(10). La norma indica come l' UR possa essere misurata direttamente o essere calcolata dalla temperatura dell'aria, dalla temperatura di bulbo umido (T_w), e dalla temperatura di rugiada (T_d). Altro riferimento è la norma UNI EN ISO 7726 (9) che specifica le prestazioni minime degli strumenti per la misurazione delle grandezze fisiche che caratterizzano un ambiente e specifica i metodi per la misurazione delle grandezze fisiche di tale ambiente.

Una rappresentazione grafica delle principali proprietà dell'aria umida, nonché delle variazioni che esse subiscono a seguito delle varie trasformazioni è costituita dai diagrammi psicrometrici.

Poiché l'aria umida nelle più comuni applicazioni subisce trasformazioni a pressione totale costante, i diagrammi psicrometrici sono tracciati per un dato valore della pressione totale (pressione atmosferica media al livello del mare, pari a 101,325 kPa).

L'altitudine della località considerata ovviamente influisce sul valore della pressione. Pertanto i diagrammi riportano normalmente i valori della pressione cui sono stati calcolati.

Due tipi di diagrammi vengono comunemente utilizzati: il diagramma di Mollier e il diagramma Carrier (generalmente denominato diagramma ASHRAE, dal nome dell'*American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers*). I due diagrammi presentano unicamente gli assi invertiti.

La Figura 3 è un esempio di diagramma psicrometrico (52) nel quale l'asse delle ascisse riporta i valori di temperatura di bulbo secco (T_a) e l'asse delle ordinate i valori di umidità assoluta o titolo (X) espressi in g_v/kg_a , pertanto i segmenti orizzontali a destra della curva di saturazione individuano trasformazioni ad umidità assoluta costante (isotitolo).

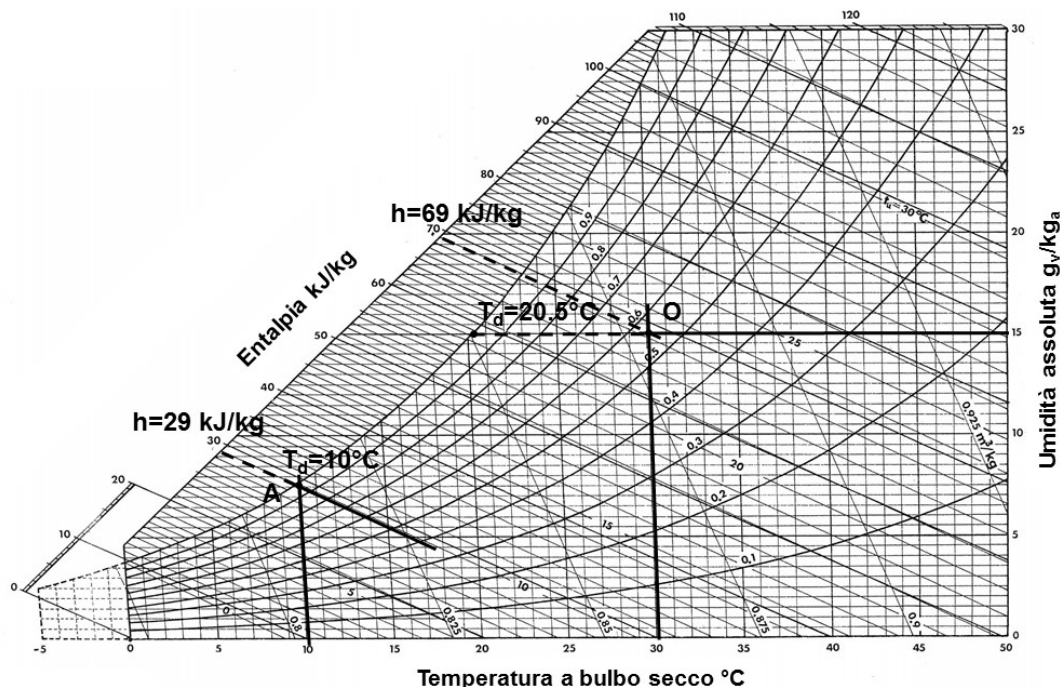


Figura 3. Diagramma psicrometrico di una miscela di aria secca e vapore d'acqua alla pressione atmosferica di 101,325 kPa

All'interno del diagramma sono riportate diverse famiglie di curve/rette distinte come segue:

- *curva di saturazione*
o curva d'umidità relativa $UR = 100\%$, che riporta per ogni temperatura, il massimo contenuto di vapore d'acqua (in grammi) che ogni kg di aria secca può contenere.
- *curve ad umidità relativa costante*
che, in base alla definizione di umidità relativa, presentano un andamento analogo a quello della curva di saturazione a valori proporzionalmente inferiori;
- *rette a temperatura di bulbo umido (T_w) costante*
o rette di umidificazione adiabatica, tali rette sono parallele tra di esse e inclinate rispetto all'asse delle ascisse; la temperatura di bulbo umido è sempre inferiore o, al massimo, uguale al valore della temperatura a bulbo secco in condizioni di saturazione;
- *rette ad entalpia h costante*
tali rette sono parallele tra di esse e inclinate rispetto all'asse delle ascisse; e dipendono sia dal titolo del vapore (X), sia da T . Sono quasi coincidenti con le rette di umidificazione adiabatica, in quanto l'aumento di entalpia dovuto all'umidificazione in condizioni adiabatiche è piccola, e per lo più viene trascurata;
- *rette a temperatura di rugiada (T_d) costante*
o rette isotitolo, tali rette sono parallele tra di esse e all'asse delle ascisse.

Per mezzo di tale diagramma è possibile risalire a tutti i parametri psicrometrici che caratterizzano l'aria di un ambiente *indoor* in esame: ciò avviene mediante la misura, effettuata mediante uno psicrometro, della temperatura aria ambiente (T_a) e della temperatura di bulbo umido (T_w).

Sul diagramma, infatti, il punto rappresentativo dell'aria viene individuato dall'intersezione di due delle curve/rette ai valori delle grandezze note.

Ad esempio, per una temperatura a bulbo secco (T_a) pari a 10°C e temperatura bulbo umido (T_w) pari a 10°C e alla pressione atmosferica (p) pari a 101,325 kPa, sul diagramma lo stato dell'aria è rappresentato dal punto A. Tale punto è individuato dall'intersezione della retta a T_a costante ($T_a = 10^\circ\text{C}$) con la retta a T_w ($T_w = 10^\circ\text{C}$) costante; e dal diagramma si legge che l'aria (rappresentata dal punto A) possiede:

- Umidità relativa $UR = 100\%$;
- Umidità assoluta o titolo $= 7,6 \text{ g/kg}_a$;
- Temperatura di rugiada $T_d = 10^\circ\text{C}$;
- Entalpia $h = 30,0 \text{ kJ/kg}$.

Ad esempio, alla pressione atmosferica pari a 101,325 kPa per una massa di aria umida con umidità assoluta pari a 15 g/kg_a e temperatura a bulbo secco (T_a) di 30°C, sul diagramma lo stato dell'aria è rappresentato dal punto O. Tale punto è individuato dall'intersezione della retta a T_a costante ($T_a = 30^\circ\text{C}$) con la retta ad umidità specifica (15 g/kg_a) costante; e dal diagramma si legge che l'aria (rappresentata dal punto O) ha:

- Umidità relativa (UR) $\sim 58\%$;
- Temperatura di rugiada (T_d) $\sim 20,5^\circ\text{C}$;
- Temperatura a bulbo umido (T_w) $\sim 23,5^\circ\text{C}$;
- Entalpia $h \sim 69 \text{ kJ/kg}$.

Dal diagramma si può vedere quando le condizioni dell'aria comportano il rischio di formazione di condensazione del vapore su una superficie: se la temperatura della superficie risulta inferiore alla temperatura di rugiada, l'aria in prossimità della stessa superficie si porta a tale temperatura, e il vapore contenuto nell'aria condensa depositando acqua liquida sulla superficie. Ad esempio, se una stanza ha temperatura dell'aria pari a 20°C e umidità relativa pari a 52% e temperatura della superficie di una finestra pari a 13°C, dal diagramma psicrometrico (vedi Figura 3) si ricava che in tali condizioni l'umidità assoluta è pari a 7,6 g/kg_a, muovendoci lungo la retta a titolo costante fino a raggiungere la curva di saturazione si osserva che la temperatura di rugiada (T_d) è pari a 10°C, pertanto non si forma condensa sulla superficie della finestra essendo la temperatura della superficie superiore a quella di rugiada.

Viceversa, se ad esempio un chilogrammo di aria in condizioni di saturazione ($UR = 100\%$) alla temperatura di 10°C (umidità assoluta circa 7,6 grammi) se riscaldata a 20°C (riscaldamento isobaro e a titolo costante) passa da un valore di umidità relativa pari a 100% al valore di circa il 52% (come si vede dalla retta che parte dal punto A del diagramma). Tale processo è indicato come riscaldamento "sensibile".

Inoltre a parità di umidità relativa l'aria a temperatura maggiore contiene una maggiore quantità di acqua, avendo un titolo maggiore.

Sul diagramma è possibile rappresentare graficamente le trasformazioni che l'aria umida subisce nelle varie fasi di processo quali la deumidificazione, l'umidificazione o il riscaldamento/raffreddamento dell'aria, e leggere i valori delle grandezza in gioco.

I processi termodinamici che interessano le miscele di aria e vapore d'acqua e che avvengono più comunemente nelle sezioni delle Unità di Trattamento Aria (UTA) di un sistema di climatizzazione sono:

- miscelazione adiabatica di più correnti di aria umida;
- riscaldamento sensibile (a titolo costante);

- raffreddamento sensibile (a titolo costante);
- umidificazione adiabatica;
- raffreddamento con deumidificazione.

Condensazione del vapor d'acqua nell'involucro edilizio

Progettazione, costruzione e manutenzione dell'involucro edilizio sono cruciali per la prevenzione e il controllo dell'eccesso di umidità e crescita microbica. Infatti, se effettuate correttamente evitano o riducono la presenza di ponti termici (53, 35) e quindi che l'umidità dell'aria condensi(50).

La condensazione (27, 53-55) come già evidenziato sopra può essere superficiale e/o interstiziale.

La normativa vigente (24, 26-27) prevede, che per gli edifici, in caso di nuova costruzione o ristrutturazione totale, sia verificata dal progettista l'assenza di condensazioni superficiali. Prevede inoltre che le eventuali condensazioni interstiziali delle pareti opache, siano limitate alla sola quantità rievaporabile, in conformità alla normativa tecnica vigente. Si deve cercare di evitare già a livello di progetto il fenomeno della condensazione interstiziale. Anche se il liquido da vapore condensato può in molti casi rievaporare, quando ciò non avviene o avviene dopo un significativo lasso di tempo, l'imbibizione del materiale provoca la riduzione dell'isolamento termico, la formazione di muffe, marcescenza. Quando poi la temperatura scende al di sotto di 0°C, si può verificare congelamento dell'acqua condensata, e conseguente dilatazione con possibile frantumazione dei materiali.

La verifica igrometrica di una struttura per evitare la condensazione del vapor d'acqua e valutare il rischio di condensazione interstiziale è dunque molto importante. Il metodo più utilizzato per la verifica del comportamento igrometrico di una struttura è quello Glaser, attuato attraverso programmi di calcolo e procedure previste anche dalle norme UNI 10350 (56) e UNI EN ISO 13788 (28). Quando l'origine del raffreddamento delle superfici è dovuto alla presenza di ponti termici, si può fare riferimento per una comprensione di tali fenomeni, alla norma UNI EN ISO 10211 (53) che definisce il ponte termico (57-58), come parte dell'involucro edilizio dove la resistenza termica, altrove uniforme, cambia in modo significativo per effetto di:

1. compenetrazione di materiali con conduttività termica diversa nell'involucro edilizio (tamponamento in mattoni con struttura in c.a.; attacco serramenti; giunti tra parete e pavimento o parete e soffitto; pilastri, setti, travi e cordoli, chiodi di fissaggio del cappotto isolante esterno, elementi di collegamento di balconi, sovrastrutture esterne attacchi per tende, scuretti, tettoie mensole) (Figura 4a);
2. discontinuità geometrica nella forma della struttura:
 - differenza tra l'area della superficie disperdente sul lato interno e quella del lato esterno, come avviene per esempio in corrispondenza dei giunti tra parete e pavimento o parete e soffitto (spigoli esterni del fabbricato, variano in relazione alla geometria dell'angolo). Un esempio sono gli spigoli (collegamenti tra parete e parete, parete e solaio, la connessione tra pareti e serramenti, ecc.) in corrispondenza dei quali aumenta la superficie disperdente e le superfici isoterme, perpendicolari al flusso termico, si incurvano (Figura 4a-e);
 - variazione dello spessore della costruzione (cavedi, nicchie, vani tecnici, canne fumarie);
3. angolo tra due pareti esterne (Figura 4b);
4. giunto tra un muro e un pavimento su passaggio aperto, cantine, box (Figura 4c);
5. giunto tra un muro e una terrazza o soffitto di sottotetto (Figura 4d);
6. giunto tra un muro esterno e un pavimento (interno o anche sporgente) (Figura 4e);

7. zone intorno o comprendenti i serramenti (mazzette, velette, davanzali, soglie, ecc.) (Figura 4 f);
8. elementi strutturali ad elevata conduttanza inseriti in altri a conduttanza inferiore (Figura 4a).

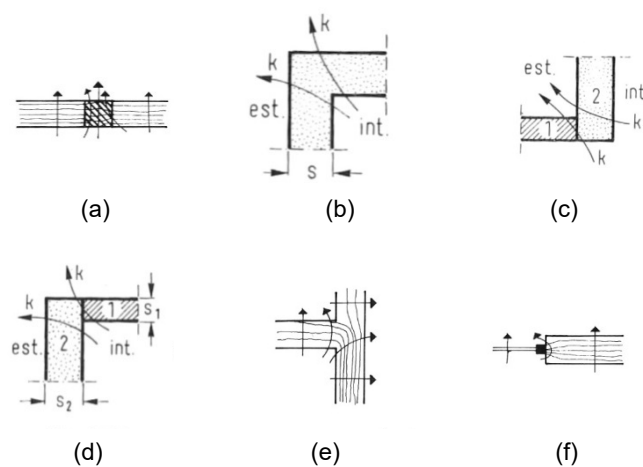


Figura 4. Esempi di ponti termici

La Figura 5 riporta uno schema di edificio con le posizioni e le tipologie di ponti termici più comuni individuati dalla norma UNI EN ISO 14683(35).

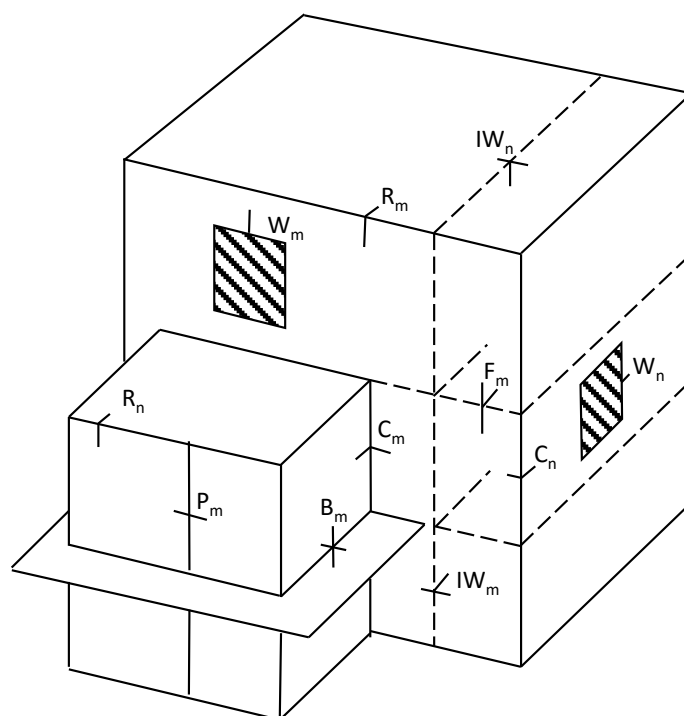


Figura 5. Schema di edificio con l'indicazione delle posizioni e delle tipologie di ponti termici più comuni identificati dalla norma UNI EN ISO 14683

La lettera maiuscola indica la posizione del ponte termico, il suffisso indica il tipico ponte termico così come segue:

- R = Parete/Tetto;
- IW = Partizione/Parete;
- B = Balcone/Parete;
- C = Parete/Parete angolo;
- P = Parete/Parete;
- F = Parete/Solaio;
- W = Apertura/Parete;
- n,m = numero ponte termico.

Ad esempio IWn denota un ponte termico alla giunzione parete esterna (involucro edilizio) e una parete interna; IWm denota un altro ponte termico dello stesso tipo.

In condizioni ideali (assenza di ponte termico e di altri fattori inficianti la condizione ideale) il flusso termico attraverso lo spessore della parete è perpendicolare alla parete e le superfici isoterme sono parallele alle superfici della parete. L'andamento della temperatura lungo la sezione della parete perpendicolare alla superficie varia invece in funzione della conduttività termica degli strati da cui la parete è costituita.

La Figura 6 riporta un esempio qualitativo della distribuzione di temperatura in un elemento edilizio multistrato.

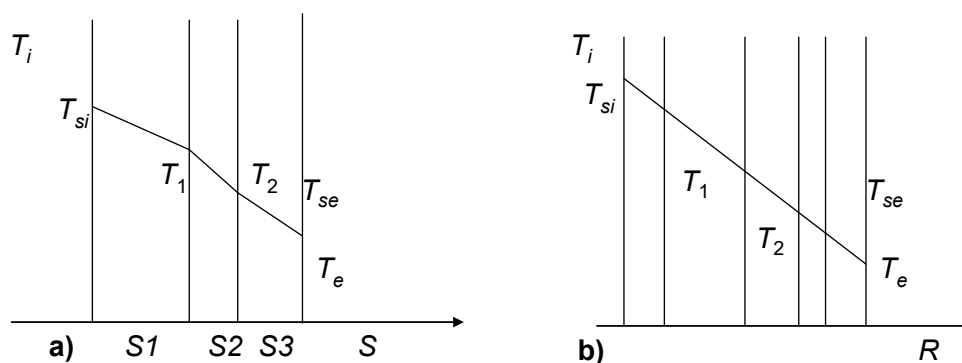


Figura 6. Distribuzione di temperatura in un elemento edilizio multistrato:
a) in funzione dello spessore di ogni strato; b) in funzione della resistenza termica di ogni strato

La norma UNI EN 13788 (28) fornisce metodi di calcolo per determinare:

- a. la temperatura superficiale interna di componenti o elementi edilizi al di sotto della quale è probabile la crescita di muffe, in funzione della temperatura e dell'umidità relativa interne.
Il metodo può essere anche utilizzato per la previsione del rischio di altri problemi di condensazione superficiale;
- b. la valutazione del rischio di condensazione interstiziale dovuta alla diffusione del vapore acqueo.
Il metodo usato non tiene conto, assumendo che l'umidità di costruzione si sia asciugata, di alcuni importanti fenomeni fisici quali:

- la variazione delle proprietà dei materiali in funzione del contenuto di umidità;
- la risalita capillare e il trasporto di umidità allo stato liquido all'interno dei materiali;
- il movimento dell'aria nei componenti, attraverso fessure o intercapedini; la capacità igroscopica dei materiali.

Di conseguenza il metodo può essere applicato solo a strutture nelle quali questi fenomeni possono essere considerati trascurabili.

- c. Il tempo che l'acqua, contenuta in uno strato compreso tra due strati con elevata resistenza al passaggio del vapore, impiega ad asciugare, nonché il rischio di condensazione che può verificarsi in altri strati del componente durante il processo di asciugatura

Il metodo per evitare la formazione della condensa si basa sul profilo delle temperature e delle pressioni parziali del vapore acqueo in una parete; e i dati necessari riguardano:

- proprietà dei materiali e dei prodotti (conduttività termica, resistenza termica, fattore di resistenza al vapore, spessore equivalente di aria per la diffusione del vapore acqueo)
- temperatura e condizioni igrometriche interne ed esterne all'edificio;
- resistenze superficiali;
- trasporto di vapore acqueo.

Utilizzando queste informazioni si calcola la pressione del vapore attraverso la parete.

In generale, se la curva di pressione parziale (p_v) del vapore non interseca in alcun punto quella di saturazione (p_s), la parete non è interessata dalla condensazione interstiziale. Se la curva di pressione parziale (p_v) interseca in uno o più punti quella di saturazione (p_s), si formerà condensa nella parete, e in particolare in corrispondenza dello strato di parete dove le due curve si intersecano. Le Figure 7-8 riportano degli esempi qualitativi di andamento delle curve di pressione di saturazione del vapore e delle pressioni parziali di vapore.

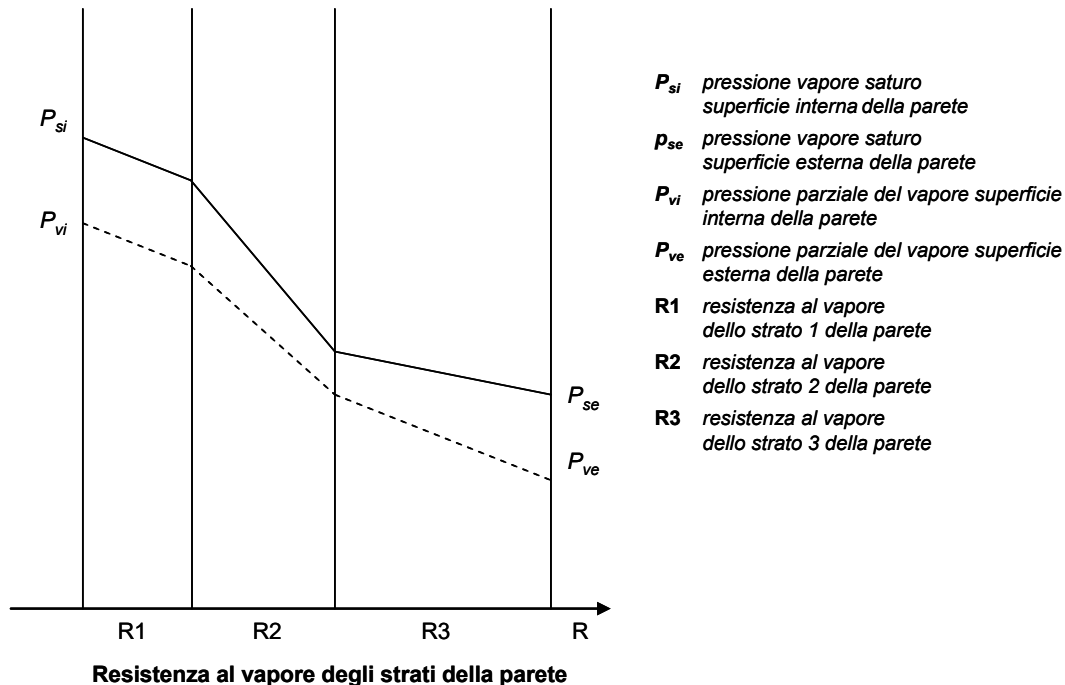


Figura 7. Parete multistrato non interessata dalla condensazione interstiziale

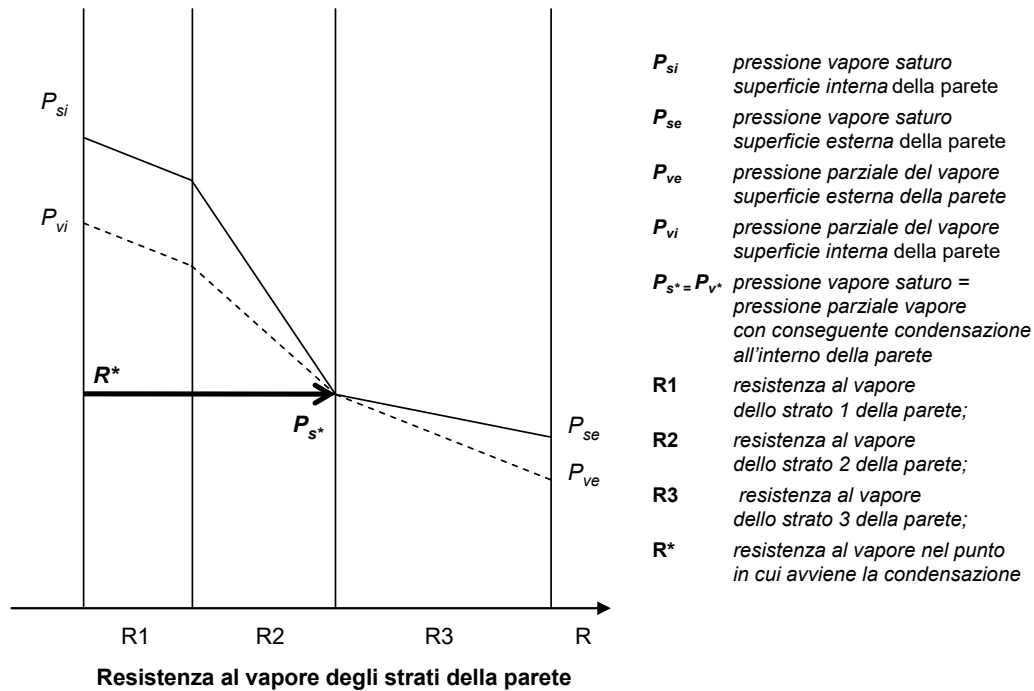


Figura 8. Parete multistrato con condensazione interstiziale in un punto

Se si considera il funzionamento di una parete in regime stazionario, il cambiamento della stratigrafia della muratura, a parità di spessori, di materiali utilizzati e delle condizioni al contorno, non influenza il valore della trasmittanza globale e della potenza termica trasmessa attraverso la parete. Possono cambiare invece i valori delle temperature superficiali in corrispondenza di ogni singolo strato della parete. Ciò chiarisce l'importanza della disposizione degli strati che deve essere curata in quanto il comportamento termico influenza anche quello igrometrico, al fine di eliminare o quantomeno contenere i rischi di condensazione all'interno delle pareti.

Come già accennato sopra, per la condensazione interstiziale è necessario tener conto del fenomeno del trasporto di vapore attraverso la parete. Si consideri una parete permeabile al vapore d'acqua che separa due ambienti che si trovano a diverse condizioni termoigrometriche. Pertanto fra le due facce della parete sussiste una differenza di pressione di vapore Δp_v che determina, in condizioni stazionarie, un flusso specifico di vapore $\dot{g}_v$ (portata massica per unità di superficie) il quale risulta proporzionale al Δp_v e inversamente proporzionale alla resistenza al passaggio del vapore (R_v), come predetto dalla legge di Fick:

$$\dot{g}_v = -\delta_v \cdot \frac{\Delta p_v}{\Delta x} = \frac{p_{vi} - p_{ve}}{R_v} \quad \left[\text{kg/m}^2\text{s} \right] \quad [1]$$

La resistenza al passaggio del vapore dello strato attraversato dipende a sua volta dallo spessore della parete Δx e dalla permeabilità al vapore del materiale δ_v , espressa in kg/m s Pa

$$R_v = \frac{\Delta x}{\delta_v} \quad \left[\frac{\text{m}^2\text{s} \cdot \text{Pa}}{\text{kg}} = \frac{\text{m}}{\text{s}} \right] \quad [2]$$

La resistenza al passaggio del vapore di una parete multistrato è data dalla somma delle singole resistenze; e la distribuzione dei valori di pressione di vapore entro la parete è ottenuta tramite la relazione (dall'analogia elettrica con la legge di Ohm):

$$\Delta p_{vi} = \frac{R_{vi}}{R_{vtot}} \Delta p_{vtot} \quad [3]$$

Con $R_{v1} = \Delta x_i / \delta_{vi}$, essendo

$$R_{vtot} = \sum_i \frac{\Delta x_i}{\delta_{vi}} \quad [4]$$

Il confronto tra pressioni parziali di vapore e corrispondenti pressioni di saturazione, determinate strato per strato a partire dalla conoscenza della distribuzione di temperatura, consente di stabilire se, in qualche punto, la pressione di vapore è uguale alla pressione di saturazione, e quindi se c'è formazione di condensa interstiziale. Tale verifica, nota come metodo di Glaser, si rappresenta su un diagramma $p - R$, sul quale l'andamento delle pressioni di vapore segue un andamento lineare (in assenza di condensa), grazie alla costanza del rapporto tra caduta di pressione e resistenza al vapore. L'andamento delle pressioni di saturazione ha invece un andamento spezzato che dipende invece dalle temperature.

Nel caso in cui c'è formazione di condensa (Figura 8) si hanno i seguenti flussi di vapore:

- in ingresso $\dot{g}_{v\ ingr} = (p_{vi} - p_s^*) / R^*$;
- in uscita $\dot{g}_{v\ usc} = (p_s^* - p_{ve}) / (R_{tot} - R^*)$.

Essi corrispondono alle pendenze che bisogna dare ai segmenti tracciati nelle figure 7-8, da cui si evince che la massa in ingresso è maggiore di quella in uscita, in accordo con il fatto che vi è formazione di condensa all'interno della parete. La portata di acqua condensata è data dalla differenza tra portata di vapore in ingresso e uscita:

$$\dot{g}_{v\ condens} = \dot{g}_{v\ ingr} - \dot{g}_{v\ usc}$$

La condensazione superficiale e/o interstiziale (54-55), nelle strutture edilizie determinano:

- degrado di tipo chimico (ossidazione, idrolisi, idratazione, corrosione);
- degrado di tipo fisico (meccanico, dilatazione termica, gelo, cristallizzazione dei sali);
- degrado di tipo biologico (muffe, microorganismi, ecc. dovuti a contemporanea presenza di alta UR e bassa temperatura);
- decadimento del benessere termoigrometrico/comfort abitativo: dovuto al gradiente di temperatura tra parete e aria (quando $\Delta T > 3^\circ\text{C}$ si avverte una sensazione di disagio in prossimità di tale superficie);
- migrazione (termoforesi) di particelle dal mezzo gassoso o liquido alla superficie quando questa è più fredda dell'aria. Le particelle di dimensioni comprese tra 0,1 e 1 μm possono perciò depositarsi sulla superficie a causa del gradiente di temperatura esistente.

Le problematiche dell'involucro edilizio si manifestano visivamente con la presenza di macchie, muffe sulle pareti, ecc., e attraverso sensazioni termiche relative alla temperatura, che comportano una diversa percezione del caldo o del freddo che alterano il benessere termico degli individui.

Temperatura in ambiente *indoor*

La temperatura dell'aria è intesa come temperatura di bulbo secco e per la definizione si richiama la norma UNI EN 13731 (37). È da fare una distinzione tra temperatura dell'aria

indoor e temperature dei diversi elementi (es. superfici solide, aria immessa, ecc.) presenti nell'ambiente. Infatti la temperatura di alcune superfici può essere differente da quella dell'aria anche di diverse decine di gradi.

Le temperature delle superfici presenti in ambienti *indoor* sono in generale influenzate dai seguenti fattori:

- irraggiamento solare diretto e indiretto;
- trasmissione del calore trasmesso attraverso le pareti o generato dalle apparecchiature interne e trasmesse all'aria;
- temperatura dell'aria esterna, velocità del vento.

L'irraggiamento solare ha l'effetto di trasmettere calore all'ambiente interno attraverso le pareti sia opache che trasparenti.

La temperatura di una superficie irraggiata sarà tanto più elevata quanto minore è il suo calore specifico o l'energia raggiante riflessa, e tanto minore quanto più è elevata la velocità dell'aria che la lambisce. L'elemento irradiato scambierà energia con l'ambiente attraverso lo scambio con le altre superfici.

Si consideri che i valori di temperatura di una parete soggetta ad irraggiamento solare diretto possono raggiungere facilmente valori di temperatura di 60°C e anche oltre.

La conduzione termica attraverso le pareti opache risulta inferiore rispetto al calore trasmesso attraverso le superfici vetrate a parità di superficie. Incrementi allo scambio termico conduttivo possono essere forniti dai ponti termici, in particolare se costituiti da materiali ad alta conduttività termica. Quando vi è generazione di calore all'interno occorre tenerne conto.

In generale la temperatura delle superfici interne viene assunta in prima approssimazione uguale alla temperatura dell'aria interna. Tuttavia alcune superfici soggette a carichi termici (calore prodotto e trasmesso attraverso di esse, o ceduto) possono presentare differenze significative. Nel seguito sono riportati alcuni tipici casi che si incontrano nei normali ambienti abitati da persone:

- quando la temperatura esterna è molto fredda (-5÷-20°C) i vetri delle superfici finestrate, anche se doppi, possono arrivare anche a 0°C o pochi gradi;
- i corpi scaldanti dell'impianto di riscaldamento si trovano a temperatura superiore a quella ambiente, in modo da cedere calore all'ambiente stesso. Ad esempio i radiatori si trovano a temperatura tra 50°C e 80°C, i pannelli radianti tra 40°C e 60°C, i ventilconvettori tra 45°C e 55°C, e i pavimenti o soffitti (nel caso di riscaldamento a pavimento o soffitto) tra 25 e 35°C;
- le luci si trovano a temperature differenti, secondo che siano ad incandescenza (circa 80°C) o a fluorescenza (circa 30÷40°C);
- forni, stufe, piastre scaldanti, parti non coibentate di canne fumarie, arricciacapelli, phon, ecc., a temperatura variabile secondo la sorgente e l'isolamento con l'ambiente sino a circa 70°C.

Tutte le superfici a temperatura differente da quella ambiente cedono o assorbono calore, contribuendo ai bilanci termici dell'edificio.

La norma UNI EN 13790 (36) stima tra 20 e 200 W per persona i valori degli apporti calorici da apparati presenti in ufficio.

Il calore metabolico generato dagli occupanti il locale analogamente alle altre sorgenti di calore può modificare in modo significativo la temperatura del locale stesso.

La Tabella 2 riporta alcuni esempi di apporti energetici ad un ambiente *indoor* derivanti da una persona in funzione dall'attività metabolica.

Tabella 2. Apporto energetico all'ambiente confinato derivante da attività metabolica di una persona

Attività metabolica	Metabolismo energetico medio [w]
Riposo (seduto a proprio agio, ecc.)	105
Basso carico metabolico (bar, ristoranti, ecc.)	180
Medio carico metabolico (laboratori didattici, sale giochi, ecc.)	295
Alto carico metabolico (palestre, discoteche, ecc.)	415
Altissimo carico metabolico	520

La temperatura media radiante è un'altra grandezza che ha grande importanza nella valutazione degli ambienti termici, essa è definita dalla norma UNI EN ISO 13731 (37) come la temperatura uniforme di una cavità nera fittizia nella quale un soggetto scambierebbe lo stesso flusso termico radiante che scambia nell'ambiente reale tra pareti non isoterme.

Da tale definizione discende la sua espressione

$$T_{mr} = \sum_i F_{p-i} T_i^4 \quad [5]$$

con T_i temperatura della superficie i -esima (in K)
e F_{p-i} il fattore di vista tra la persona e la superficie i -esima.

Dalla definizione risulta la temperatura media pesata delle temperature delle superfici che delimitano l'ambiente e scambiano calore radiante con la persona, incluso l'effetto dell'irraggiamento solare incidente. Insieme alla temperatura dell'aria (T_a) e alla sua velocità (V_a), la T_{mr} è uno dei fattori che influenzano significativamente la sensazione di caldo/freddo in quanto può aggiungersi o compensare gli scambi termici tra la superficie corporea delle persone e l'aria.

Viene definita temperatura operativa quella di un ipotetico ambiente con $T_a = T_{mr}$ e con velocità dell'aria trascurabile, e umidità relativa 50% e che dà la stessa sensazione di caldo/freddo dell'ambiente considerato; praticamente si può stimare tale temperatura operativa come all'incirca la media aritmetica tra quella dell'aria e quella media radiante.

Correlazione umidità e temperatura dell'aria *indoor/outdoor*

Da tener presente che l'influenza della temperatura dell'aria *outdoor* sulla temperatura dell'aria *indoor*, è complessa, a tal riguardo si richiama il lavoro di Nguyen JL et al (59) che riporta che la relazione tra temperature *indoor* e *outdoor* risulta globalmente non lineare:

- ad alte temperature c'è una forte correlazione tra temperature *indoor* e *outdoor* (coefficiente di correlazione Pearson, $r=0,91$, $\beta=0,41$);
- a più basse (fredde) temperature la correlazione è debole ($r=0,40$, $\beta=0,04$).

Analoghi risultati sono stati riscontrati anche per la temperatura percepita. Invece per umidità relativa e umidità assoluta le relazioni tra *indoor* e *outdoor* risultano lineari.

La correlazione per l'umidità relativa è stata modesta ($r=0,55$, $\beta=0,39$).

L'umidità assoluta ha una correlazione più forte tuttavia a temperature esterne più calde. L'umidità relativa *outdoor* è un indicatore debole dell'umidità relativa *indoor*, mentre l'umidità assoluta *indoor* ha una forte correlazione con quella *outdoor* nel corso dell'intero anno.

Tali risultati (59) derivano dallo studio effettuato in 16 abitazioni in Greater Boston per il periodo di un anno maggio 2011/aprile 2012 e paragonate con le misurazioni eseguite all'aeroporto Boston Logan.

Aerazione/movimento dell'aria in ambienti *indoor*

L'aerazione/ventilazione(60-63) può avvenire in modo:

- *naturale*, per differenza di pressione tra la pressione statica e la pressione del vento, e/o per differenze di temperatura;
- *artificiale*, tramite ventilatori od altri dispositivi meccanici di immissione/estrazione o con sistemi di ricircolo aria previo trattamento.

In generale, l'aria esterna immessa con sistemi meccanici agisce in modo "controllato", mentre quella per infiltrazione, attraverso fessure, porte, finestre, muri e altro, ha comportamenti casuali ed è determinata dalla differenza di pressione tra interno ed esterno.

La quantità di aria infiltrata dipende dalla dimensione delle aperture, dalla tortuosità dei percorsi, dalle crepe o dalle discontinuità delle chiusure perimetrali.

I fattori che influenzano i flussi di aria (64) sono:

- posizione delle aperture;
- area d'apertura;
- tipo e modalità di apertura.

Le aperture per il passaggio dell'aria sono costituite da:

- finestre apribili;
- dispositivi specifici per la ventilazione, quali griglie e bocchette, ecc.;
- porte, portoni, ecc.;
- passaggi comunicanti con l'esterno o con altri ambienti interni adiacenti, aperti occasionalmente o in modo stabile o in modo alternato con maggiore o minore frequenza.

Da tener presente inoltre che la pressione generata dal vento sulle superfici dell'involucro edilizio dipende dalla velocità del vento stesso, dalla forma dell'edificio ed dal suo orientamento rispetto alla direzione del vento.

Aerazione naturale e distribuzione degli spazi

Per individuare il movimento dell'aria in un ambiente confinato è necessario considerare la distribuzione degli spazi e delle aperture in quanto esse determinano i flussi dell'aria stessa e la direzione prevalente del vento sulle superfici esterne. Infatti, aperture esterne complanari influenzano l'aerazione generata dal vento. L'entità e l'efficacia dell'aerazione dipendono fortemente dalla direzione del vento. Aperture esterne poste a quote diverse possono modificare i movimenti di aria verticali generati dai gradienti termici interni.

Qui di seguito si riporta la descrizione di come l'aria si muove orizzontalmente e verticalmente in un ambiente *indoor*.

Aerazione naturale e distribuzione orizzontale degli spazi

Nella distribuzione orizzontale si deve considerare la potenzialità di aerazione dovuta al vento.

Nella distribuzione orizzontale degli spazi il movimento dell'aria dipende dal gradiente di pressione, l'aria tende a circolare dal lato sopravvento verso il lato sottovento; ovvero dal lato a pressione maggiore verso il lato a minor pressione. Sopravento/sottovento sono concetti relativi, in quanto dipendenti dalla direzione del vento: le finestre (aperture), gli oggetti o le zone sopravvento sono quelli che sono colpiti prima, rispetto ad altre, dal vento.

L'efficacia dell'aerazione dipende, principalmente, dall'angolo d'incidenza del vento rispetto alla parete su cui è posizionata l'apertura di ingresso dell'aria.

Qui di seguito si riportano alcuni esempi di distribuzione orizzontale dell'aria in un ambiente confinato. La Figura 9 riporta l'andamento dei flussi di aria per ventilazione naturale passante in un ambiente confinato con due aperture contrapposte, di cui una posta sopravvento e l'altra sottovento che determinano una condizione di aerazione efficace. Nel caso di vento con direzione perpendicolare alle pareti dell'edificio e obliqua rispetto alla congiungente le aperture (Figura 10) si avrà un'ulteriore efficacia dell'aerazione dovuta al rimescolamento dell'aria.

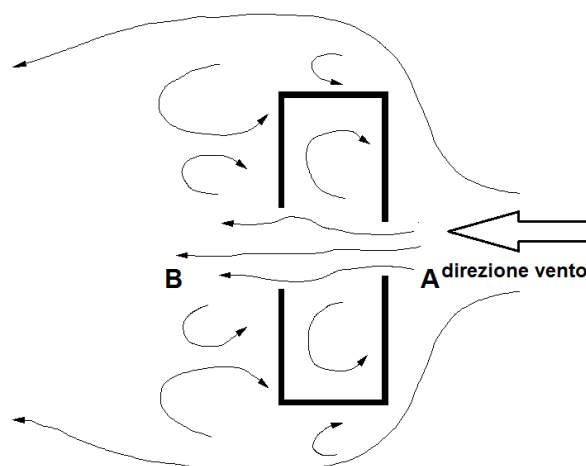


Figura 9. Distribuzione orizzontale, andamento dei flussi di aria per ventilazione naturale passante in un ambiente confinato con una apertura/finestra posta sopravvento (A) e l'altra sottovento (B) (modificata da www.nextville.it)

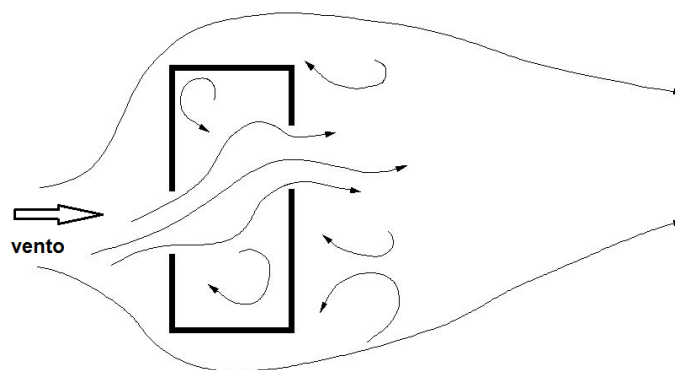


Figura 10. Distribuzione orizzontale-andamento dei flussi di aria per ventilazione naturale passante in un ambiente confinato e con unica apertura/finestra posta sopravvento che determina una condizione di aerazione molto efficace (congiungente le aperture obliqua rispetto alla direzione del vento) (modificata da www.nextville.it)

Un'ulteriore efficacia dell'aerazione, rispetto a quella prodotta dal vento perpendicolare alle aperture, si ha nel caso di direzione obliqua (angolo di incidenza $<45^\circ$) del vento rispetto alle facciate dell'edificio, sia con aperture contrapposte (Figura 11), sia con aperture poste su tre pareti contigue (Figura 12).

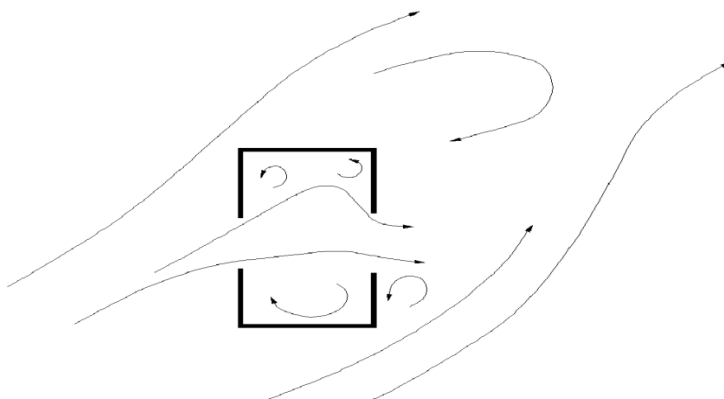


Figura 11. Andamento dei flussi di aria per ventilazione naturale passante in un ambiente confinato e con 2 aperture contrapposte con direzione obliqua (angolo di incidenza $< 45^\circ$) del vento rispetto alle facciate dell'edificio che genera una ventilazione più efficace (modificata da www.nextville.it)

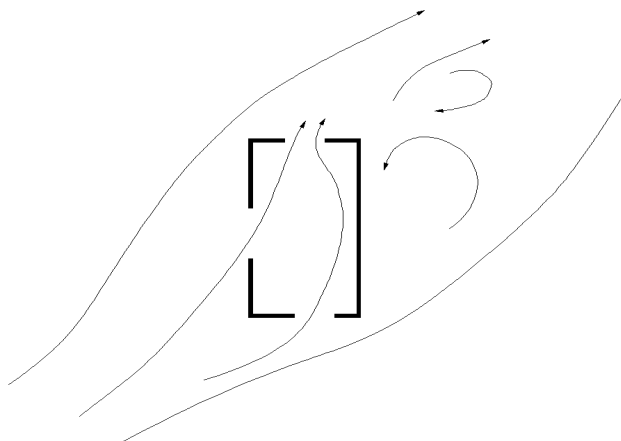


Figura 12. Andamento dei flussi di aria per ventilazione naturale passante in un ambiente confinato e con aperture poste su tre pareti e con direzione del vento obliqua (angolo di incidenza $< 45^\circ$) rispetto alle facciate dell'edificio(modificata da www.nextville.it)

Nel caso di aerazione passante da vento, la differenza di quota tra le aperture di ingresso e di uscita dell'aria influenza il movimento di aria e conseguentemente le modalità di rimescolamento.

La Figura 13 riporta alcuni esempi di andamento del flusso di aria interno ad un ambiente, in funzione della posizione verticale delle aperture. La Figura 14 riporta un esempio di efficacia dell'aerazione naturale ai fini rimozione/diluizione inquinanti di un appartamento con due differenti direzioni del vento. Nel caso della Figura 13a la ventilazione naturale passante in un appartamento con direzione del vento inclinata rispetto alla perpendicolare alle pareti perimetrali genera un'aerazione meno idonea rispetto a quella della Figura 13b in cui la direzione del vento è perpendicolare. Ciò è dovuto ad una non idonea ubicazione delle unità ambientali rispetto alle direzioni dei venti prevalenti.

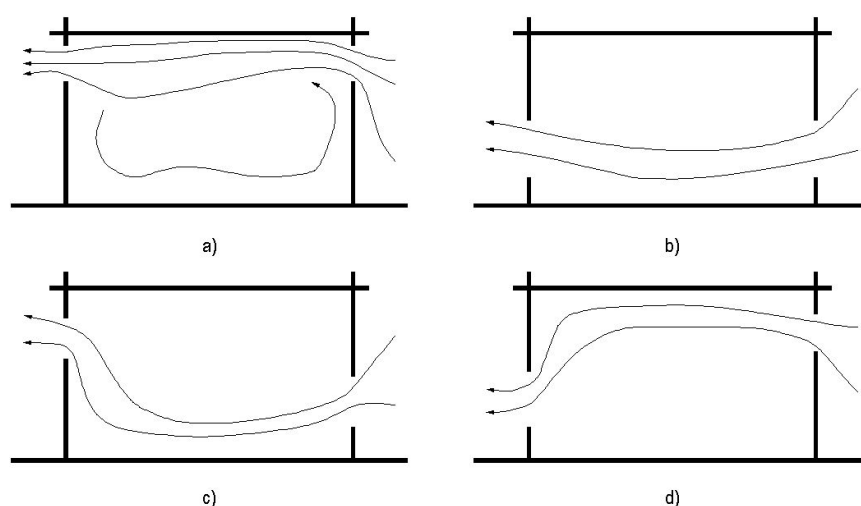


Figura 13. Andamento del flusso di aria interno ad un ambiente, in funzione della posizione verticale delle aperture: a) aperture poste alla stessa quota in alto; b) aperture poste alla stessa quota; c) aperture poste a quote diverse (quella sopravvento a quota inferiore); d) aperture poste a quote diverse (quella sopravvento a quota superiore) (modificata da www.nextville.it)

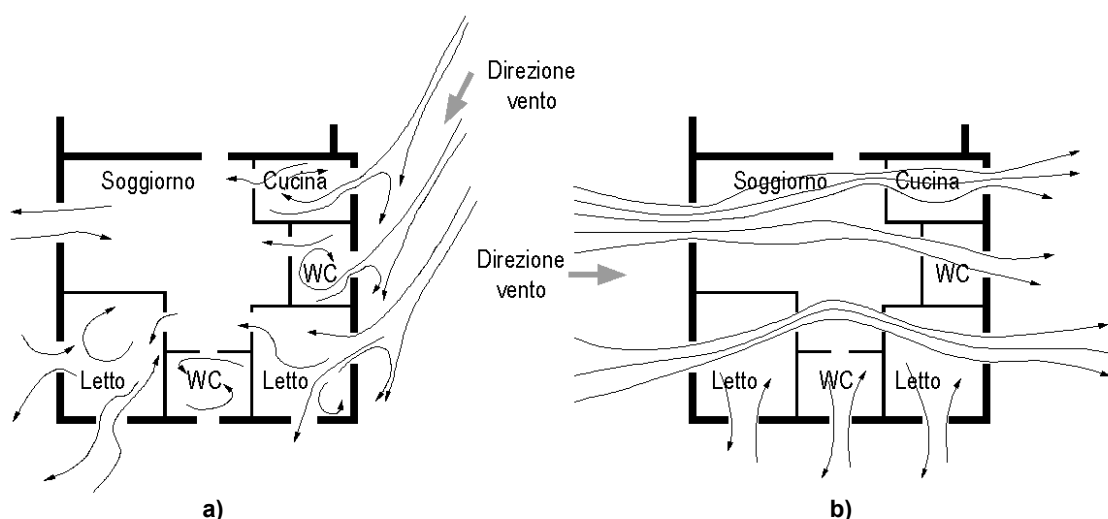


Figura 14. Esempi di flussi di aria per ventilazione naturale passante in un appartamento: a) con direzione del vento inclinata rispetto alla perpendicolare alle pareti perimetrali; b) con direzione del vento perpendicolare alle pareti perimetrali (modificata da www.nextville.it)

Aerazione naturale e distribuzione verticale degli spazi

Nella distribuzione verticale degli spazi, aperture esterne poste a quote diverse influenzano il movimento di aria verticale generato dal gradiente di temperatura.

In generale, gli ambienti con maggior produzione di calore posti in basso tendono ad esaltare l'effetto camino che determina un movimento dal basso verso l'alto in funzione del gradiente di temperatura tra le quote verticali.

Aperture posizionate in basso e sopravento e aperture posizionate in alto e sottovento determinano un effetto camino che viene accentuato in presenza di un gradiente termico.

Un'azione combinata dei due effetti, direzione vento ed effetto camino, si ottiene con le aperture d'uscita a torrino, collocate in corrispondenza del colmo del tetto (Figura 15).

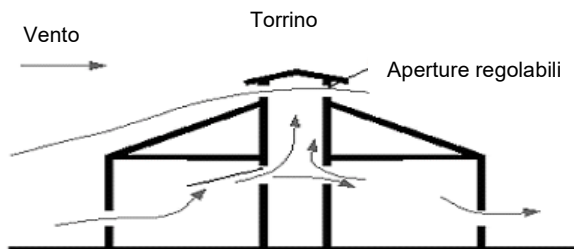


Figura 15. Schema di aperture a torrino sul tetto e relativi flussi di aria
(modificata da www.nextville.it)

I torrini possono essere a doppio flusso (accoppiamento estrazione e immissione).

Il torrino con due flussi accoppiati (Figura 16) è suddiviso in due condotti: uno per l'ingresso del flusso di aria (generato dal vento), l'altro per l'uscita del flusso. La regolazione d'ingresso e d'uscita del flusso può anche avvenire tramite serramenti a doghe orientabili.

La pendenza del tetto deve essere di almeno 25° , in modo da garantire che non si creino zone di depressione in corrispondenza dell'apertura d'ingresso del flusso. È da considerare la possibilità di formazione di cortocircuito dell'aria alla base dei condotti che comporterebbe una scarsa aerazione.

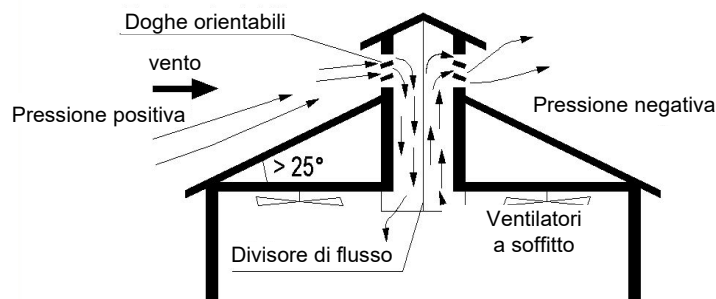


Figura 16. Aperture a torrino sul tetto e relativi flussi di aria: torrino a doppio flusso
per lo sfruttamento combinato vento + effetto camino (modificata da www.nextville.it)

Aperture superiori

Le aperture superiori, in relazione alla loro collocazione sul tetto e alla posizione del piano di apertura, si distinguono in:

- complanari al tetto (es. i lucernari);
- chiusure con piano d'apertura verticale (es. abbaini e finestre di tetti *a shed*);
- chiusure speciali (es. i torrini di estrazione o di immissione o torrini accoppiati).

I lucernari su tetto piano possono operare sostanzialmente nel verso di uscita del flusso. In tal caso l'aerazione è funzione delle altre aperture presenti nell'ambiente o negli ambienti adiacenti, e l'effetto è del tipo combinato: vento + effetto camino.

I lucernari su tetto a falda possono svolgere entrambi le funzioni di regolatori d'ingresso o d'uscita del flusso di aria in relazione all'inclinazione e alla posizione della falda stessa, rispetto alla direzione del vento.

Per pendenza inferiore a circa 25° , le falde del tetto sono in zona di depressione; quindi, la funzione prevalente di un lucernario collocato su tali falde è quella di regolatore del flusso in uscita; tuttavia, il tipo d'apertura a ribalta, tipico dei lucernari (per evitare infiltrazioni d'acqua) consente anche l'immissione del flusso di aria che sale lungo la falda (Figura 17a).

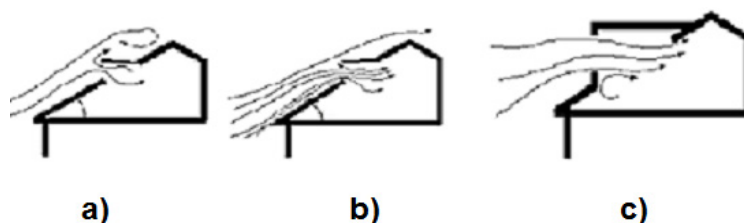


Figura 17. Flussi di aria attraverso chiusure esterne permeabili poste su un tetto a falde: a) lucernario nel caso di pendenza della falda tetto inferiore $< 25^\circ$, b) lucernario nel caso di pendenza della falda tetto inferiore $> 25^\circ$; c) lucernario (abbaino) con piano d'apertura verticale, indipendente dall'inclinazione della falda (modificata da www.nextville.it)

Per pendenze maggiori ($> 25^\circ$), la falda è parzialmente in sovrappressione, perciò è possibile realizzare una ventilazione passante a livello di sottotetto tra due o più lucernari (Figura 17b) collocati, rispettivamente, sulla falda sopravvento e su quella sottovento del tetto. Nel caso di lucernari con piano d'apertura verticale, l'inclinazione della falda ha un'influenza minima sulle caratteristiche di regolazione dei flussi di aria, che dipendono soprattutto dall'orientamento della chiusura stessa rispetto alla direzione prevalente del vento. In condizioni favorevoli, si può produrre un flusso di aria in ingresso maggiore che in una chiusura laterale (Figura 17c), generando una ventilazione passante di sottotetto molto efficace, se sono collocati lucernari anche sulla falda sottovento. Infine, esistono chiusure permeabili superiori speciali finalizzate ad aumentare i flussi di aria entranti e uscenti da un edificio, senza l'aiuto di ventilatori. Tra queste vi sono i torrini di ventilazione e i camini solari.

Per i torrini, vale quanto già detto nel paragrafo precedente. La regolazione d'ingresso e d'uscita del flusso può anche avvenire tramite serramenti a doghe orientabili (*vedi* Figure 15 e 16).

Aperture (finestre)

La portata di aria che attraversa una apertura (finestra) è direttamente proporzionale alla sua area; il rapporto tra l'area di ingresso del flusso e quella di uscita influisce sulla portata. Pertanto in presenza di aperture chiudibili/regolabili e in presenza di schermi andrà considerata la regolazione della loro apertura, e in definitiva l'area effettiva di passaggio dell'aria. Qui di seguito si riportano alcuni tipi di aperture (finestre):

– Apertura a rotazione su asse verticale od orizzontale

Le finestre con apertura a rotazione su asse verticale, comprendenti la finestra a battente (singolo o doppio) e il bilico verticale, hanno un'area di apertura di circa il 90% di quella

di chiusura, nella finestra a battente, e di circa il 70% nel bilico e regolano la direzione di flusso in senso orizzontale (Figura 18).

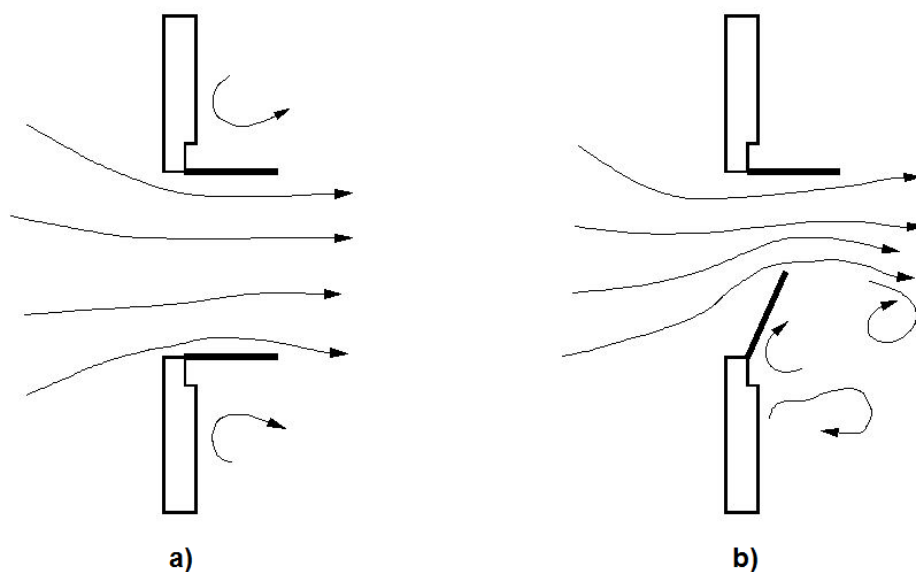


Figura 18. Flussi di aria attraverso finestra, con apertura a rotazione su asse verticale, a doppia anta: a) con entrambe le ante aperte; b) con una anta semiaperta (vista in pianta) (modificata da www.nextville.it)

Le finestre a rotazione su asse orizzontale (vasistas, la ribalta e il bilico orizzontale), hanno un'area di apertura ridotta (1/3 dell'area della chiusura nel vasistas e nella ribalta, 2/3 nel bilico), e regolano la direzione di flusso in senso verticale (Figura 19).

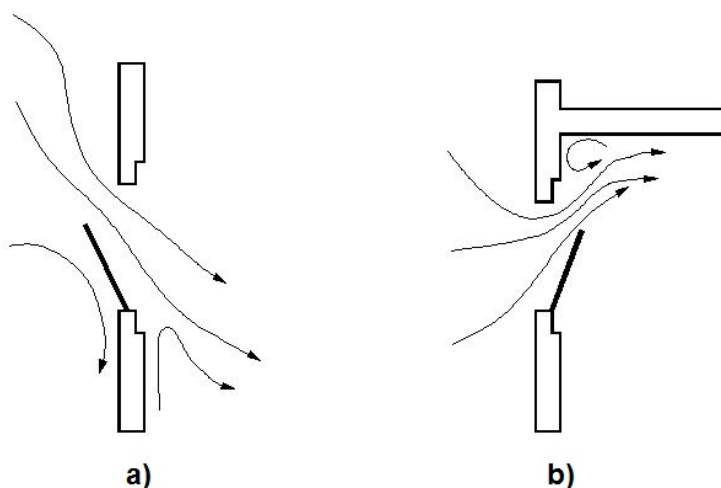


Figura 19. Flussi di aria attraverso finestra, con apertura a rotazione su asse verticale, a doppia anta (vista in sezione): a) a ribalta (vista in sezione); b) a vasistas (modificata da www.nextville.it)

– *Apertura scorrevole (verticalmente od orizzontalmente)*

Le finestre scorrevoli, sia verticali che orizzontali, hanno un'area di apertura al massimo il 50% dell'area totale di chiusura, salvo per il tipo scorrevole orizzontale ad incasso; la regolazione della direzione di flusso avviene in senso verticale od orizzontale, secondo la modalità di apertura (Figura 20).

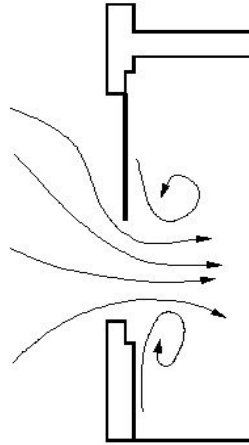


Figura 20. Flussi di aria attraverso finestra, con apertura a scorrimento verticale, a doppia anta (vista in sezione) (modificata da www.nextville.it)

– *Apertura combinata a rotazione e scorrevole*

Le finestre ad apertura combinata – quali il vasistas bilanciato (scorrevole + rotazione su asse orizzontale) e il vasistas (rotazione su asse orizzontale + rotazione su asse verticale) – regolano il flusso secondo la modalità d'apertura adottata.

Schermi

Gli schermi (tendaggi, tapparelle, persiane, e altri dispositivi assimilabili) regolano i flussi di aria e un controllo dell'irraggiamento solare.

Gli effetti degli schermi sui movimenti di aria variano in relazione al tipo e alla modalità di apertura.

Gli schermi esterni, generalmente più rigidi, svolgono funzioni di controllo sia della portata (mediante variazione dell'area di apertura), sia della direzione di flusso.

Gli schermi interni, generalmente meno rigidi, agiscono prevalentemente sulla direzione e hanno un effetto di riduzione della velocità media nell'ambiente interno.

Gli schermi ad anta a rotazione hanno una notevole flessibilità di funzionamento, sia per il controllo della variazione dell'area d'apertura, sia per quello della direzione di flusso, purché siano fissati al muro in posizioni variabili (Figura 21a); quelli ad anta scorrevole consentono unicamente la regolazione dell'area di apertura (Figura 21b).

Gli schermi a doghe verticali dirigono il flusso di aria in senso orizzontale mentre quelli a doghe orizzontali (tipo veneziana) lo dirigono in senso verticale.

Gli schermi avvolgibili controllano la portata del flusso di aria attraverso la regolazione dell'area d'apertura.

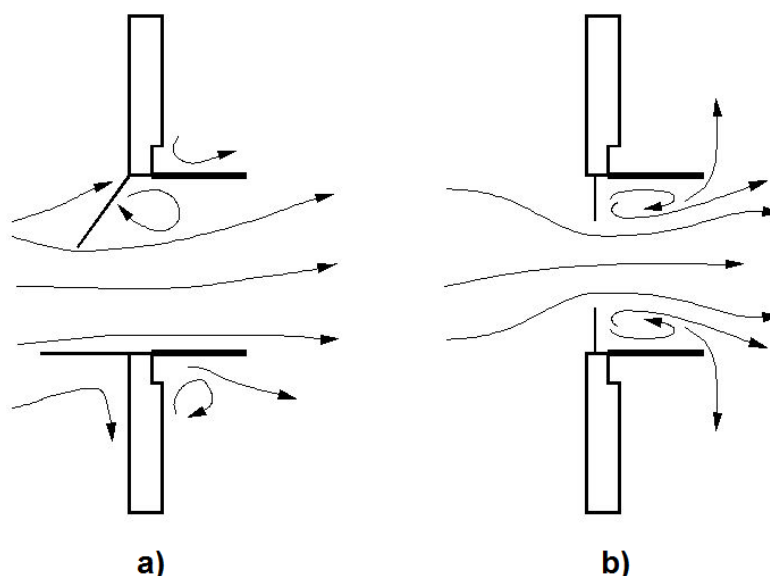


Figura 21. Flussi di aria attraverso schermo esterno ad incasso: a) ad anta a rotazione(vista in pianta); b) ad anta scorrevole (vista in pianta) (modificata da www.nextville.it)

Aerazione meccanica

La ventilazione meccanica (forzata) rappresenta l'alternativa alla ventilazione naturale quando quest'ultima non è possibile o non è sufficiente.

Riguardo all'aria esterna immessa per ricircolo forzato od all'aria interna ricircolata, si fa presente che è necessario un trattamento (filtrazione) dell'aria.

La ventilazione costituisce un ulteriore carico termico che l'impianto (di riscaldamento o condizionamento) deve compensare in quanto l'aria immessa negli ambienti proviene in genere dall'esterno e poi trattata fino alle condizioni di benessere (comfort).

La ventilazione meccanica può essere ottenuta sia mediante ventilatori di estrazione sia mediante ventilatori di immissione.

È opportuno sottolineare che solo in casi rari è possibile realizzare un buon impianto di ventilazione meccanica con sola estrazione o sola immissione. Ciò sarà possibile o quando le perdite di tenuta dei locali serviti sono in grado di bilanciare l'aria immessa/estratta dall'impianto o per gli impianti a totale ricircolo.

Si deve inoltre considerare che solo nel caso di situazioni meteorologiche miti, e in assenza di fonti cospicue di calore o di umidità o di freddo, la sola ventilazione è in grado di assicurare il necessario comfort microclimatico.

L'impianto di ventilazione ovvero l'impianto di immissione/estrazione dell'aria che sia o meno trattata (in questo caso si tratterà di impianto di climatizzazione) deve perseguire diversi obiettivi.

L'aria immessa e l'aria estratta dovranno essere ben bilanciate e ben distribuite in modo da:

- garantire il rispetto dei ricambi di aria di progetto;
- evitare zone di ristagno;
- realizzare velocità dell'aria confortevoli;
- mantenere le differenze di pressione desiderate tra un ambiente e l'altro (ad esempio servizi igienici in depressione rispetto alle sale di ristoro);

- mantenere la purezza dell'aria mediante l'immissione nell'ambiente di un'adeguata quantità di aria di rinnovo;
- mantenere la purezza dell'aria mediante l'appropriata scelta del punto di prelievo e la filtrazione dell'aria movimentata;
- realizzare un'efficace distribuzione dell'aria in modo da avere un ricambio omogeneo in ogni parte del locale ed evitare la formazione di fastidiose correnti di aria.

La legislazione e le normative concernenti la qualità dell'aria non prescrivono limiti in termini di quantitativi massimi accettabili di sostanze inquinanti nell'aria *indoor* ma forniscono indicazioni in merito alla quantità di aria di rinnovo che deve essere immessa o la quantità di aria che deve essere estratta in presenza di determinate attività o affollamenti.

I parametri correntemente utilizzati per descrivere la quantità di ventilazione meccanica sono:

- ricambi di volume per ora e per unità di volume di aria ambiente (n);
- portate specifiche di aria per persona (Q_p);
- portate specifiche di aria per unità di superficie del locale (Q_s).

I ricambi orari sono la portata specifica per m^3 di aria ambiente. Questa quantità, moltiplicata per il volume dell'ambiente stesso, determina il volume di aria che attraversa il locale in oggetto in 1 ora, e dunque il numero di ricambi di aria con cui, nell'ipotesi di perfetto miscelamento, l'aria viene sostituita nel locale in tale periodo.

In altre parole i ricambi/ora n rappresentano il numero per il quale occorre moltiplicare il volume dell'ambiente (espresso in m^3) per ottenere la portata volumica di aria (in m^3/h) richiesta all'impianto.

Questo modo di esprimere le portate di aria solitamente sottostima l'aerazione necessaria negli ambienti piccoli con eccessivo affollamento.

Le portate specifiche per persona (Q_p in m^3/h o in L/s per persona), moltiplicate per l'affollamento previsto (quest'ultimo inteso come numero di persone per m^2) e per la superficie dell'ambiente rappresentano la portata richiesta di aria di rinnovo che l'impianto dovrà fornire.

Questo criterio tende a sottostimare l'aerazione richiesta per locali poco affollati e di grandi dimensioni.

In alcune norme tecniche le portate di aria sono espresse come portata specifica per unità di superficie (Q_s in $m^3/h m^2$ o in $L/s m^2$). Questo modo di descrivere le portate necessarie si adatta abbastanza bene ad ambienti non sovraffollati e di dimensione medio grandi.

Le linee guida (65) del Coordinamento tecnico interregionale della prevenzione nei luoghi di lavoro suggeriscono di adottare il maggiore dei tre valori ove questi risultino incoerenti tra loro.

L'aria di rinnovo viene aspirata dall'esterno dell'edificio. Poiché nell'aria esterna e in quella di eventuale ricircolo possono essere presenti contaminanti, la norma UNI 10339 (66) suggerisce a questo proposito il posizionamento della presa di aria esterna ad un'altezza di 4 m sopra il piano stradale più elevato e il rispetto di un'analoga distanza da fonti contaminanti puntiformi (ad es. camini, estrazioni di aria interna, ecc.).

Si possono prevedere sistemi di filtrazione. Per le prestazioni di un filtro meccanico sono particolarmente importanti tre caratteristiche:

- la capacità del filtro a rimuovere le polveri da un flusso di aria (rendimento della filtrazione) per particelle al di sopra di una certa dimensione;
- la quantità di polveri che il filtro è in grado di trattenere nel corso della sua vita operativa in condizioni prefissate (capacità di ritenzione delle polveri);
- la resistenza opposta dal filtro all'attraversamento dell'aria (perdita di carico).

La norma UNI 10339 (66) classifica i filtri in 14 classi e 3 livelli di efficienza: media, alta e altissima.

La distribuzione dei punti di immissione ed estrazione dell'aria risulta critica.

Una soddisfacente distribuzione della ventilazione nell'ambiente, indispensabile per garantire un efficace ricambio dell'aria dell'ambiente *indoor*, dipende non solo dalla portata dell'impianto ma anche dal tipo e dal posizionamento delle bocche di mandata e di estrazione, dalla temperatura dell'aria immessa, dalle sorgenti di calore presenti nell'ambiente, dagli elementi meccanici che possono favorire il rimescolamento dell'aria, dal peso specifico degli inquinanti da eliminare, dai gradienti di pressione tra gli ambienti circostanti.

L'efficacia della distribuzione dell'aria è rappresentabile col parametro "età dell'aria", che descrive in modo relativo il tempo di permanenza dell'aria stessa nell'ambiente mediante il confronto di concentrazioni di inquinanti nell'aria.

L'età dell'aria può essere valutata come:

- età media dell'aria localizzata, in un determinato punto;
- età media dell'aria dell'ambiente.

Si determina "l'età dell'aria localizzata" soprattutto per individuare sacche di ristagno dell'aria.

"L'età media dell'aria dell'ambiente" è invece la media spaziale delle "età dell'aria localizzata" nell'intero volume della stanza e definisce l'efficacia del funzionamento del sistema di ventilazione.

L'età media dell'aria localizzata si misura rapportando la concentrazione degli inquinanti in quel determinato punto rispetto alla concentrazione degli inquinanti all'uscita (punto di estrazione).

L'età media dell'aria ambiente si misura rapportando la concentrazione media degli inquinanti (o meglio, di un gas tracciante, utilizzando per esempio il metodo del gas tracciante per la determinazione dei ricambi di aria negli ambienti, cfr. appendice A) in più punti omogeneamente distribuiti nell'ambiente rispetto alla concentrazione degli inquinanti all'uscita (punto di estrazione).

Come noto, la situazione climatica e di rinnovo/ricambio dell'aria di un locale dipende da un insieme di fattori, molti dei quali sono decisi a livello di progettazione dell'edificio (situazione climatica esterna, soleggiamento, isolamento termico delle pareti, rapporti aeranti, ecc.), sui quali si può intervenire anche successivamente.

Risulta evidente che il miglior presupposto per un ambiente gradevole dal punto di vista microclimatico e dei ricambi di aria di rinnovo sia quello di mettere in atto tutte le misure utili a raggiungere condizioni di comfort in modo naturale.

Naturalmente, nel caso ciò non sia sufficiente sono normalmente adottati quegli ulteriori provvedimenti che modificano le condizioni ambientali agendo su una o più quantità fisiche in modo da portare gli indici di qualità all'interno degli intervalli di comfort. Ciò significa che bisogna ricorrere ad impiantistica specifica per i necessari ricambi di aria, per il riscaldamento, per il raffrescamento o il raffreddamento.

Gli impianti agiscono essenzialmente sui seguenti parametri dell'aria: velocità, temperatura e umidità. Gli stessi impianti possono agire su uno o più parametri e contemporaneamente possono o meno fare ricorso ad immissione di aria esterna.

Le classificazioni degli impianti e le relative definizioni che si ritrovano in letteratura sono stabilite in funzione:

- dei parametri microclimatici su cui l'impianto agisce;
- delle modalità di influenza sui parametri, ovvero del fluido termovettore (acqua, aria o entrambi);
- del ricorso all'immissione di aria esterna ed eventuale ricircolo.

La norma UNI 10339 classifica gli impianti aeraulici in funzione dello scopo cui sono destinati, e le relative definizioni, che per comodità di riferimento si riportano con la numerazione della norma stessa, sono le seguenti:

4.2 Climatizzazione: realizzazione e mantenimento simultaneo negli ambienti delle condizioni termiche, igrometriche, di qualità e movimento dell'aria comprese entro i limiti richiesti per il benessere delle persone.

4.3 Condizionamento dell'aria: trattamento volto a conseguire la qualità dell'aria e le caratteristiche termoigrometriche richieste.

4.4 Termoventilazione: realizzazione e mantenimento simultaneo negli ambienti delle condizioni di cui al punto 4.2, escluso il controllo igrometrico.

4.5 Ventilazione: realizzazione e mantenimento negli ambienti delle condizioni di cui al punto 4.2, escluso il controllo termico ed, eventualmente, il controllo igrometrico.

4.6 Impianto aeraulico: insieme di apparecchiature, dispositivi, accessori e controlli necessari per realizzare la desiderata qualità dell'aria nelle condizioni prefissate.

4.7 Impianto per la climatizzazione (o di condizionamento dell'aria), per la termoventilazione, per la ventilazione: impianto aeraulico destinato ad espletare le condizioni di cui, rispettivamente, in 4.2, 4.4 e 4.5.

5.1.1 Impianti per la climatizzazione: rispondono ai requisiti di cui 4.2 in tutte le stagioni.

5.1.2 Impianti per la climatizzazione invernale: rispondono ai requisiti di cui in 5.1.1 limitatamente al periodo invernale.

5.1.3 Impianti per la climatizzazione estiva: rispondono ai requisiti di cui in 5.1.1 limitatamente al periodo estivo.

5.1.4 Impianti per termoventilazione: rispondono ai requisiti di cui 4.4 in tutte le stagioni.

5.1.5 Impianti per termoventilazione invernale: rispondono ai requisiti di cui in 5.1.4 limitatamente al periodo invernale.

5.1.6 Impianti per termoventilazione estiva: rispondono ai requisiti di cui in 5.1.4 limitatamente al periodo estivo.

5.1.7 Impianti per la ventilazione: rispondono ai requisiti di cui 4.5 in tutte le stagioni.

Nella norma UNI 10339 gli impianti aeraulici sono classificati anche secondo:

- le funzioni svolte;
- le modalità di funzionamento;
- la localizzazione dei trattamenti.

Gli impianti vengono classificati sulla base della funzione che svolgono che secondo la stessa norma sono: filtrazione, riscaldamento, raffrescamento, condizionamento, umidificazione, deumidificazione.

Per quanto riguarda le modalità di funzionamento la norma distingue:

- Impianti a funzionamento continuo: atti a mantenere le condizioni prefissate con continuità nelle 24 ore;
- Impianti a funzionamento discontinuo periodico: atti a mantenere le condizioni prefissate per alcune ore della giornata o in certi giorni della settimana;
- Impianti a funzionamento discontinuo aperiodico: atti a mantenere le condizioni prefissate per periodi saltuari e per durate irregolari.

In base alla localizzazione dei trattamenti la norma definisce:

- *Impianti con trattamento centralizzato*

Caratterizzati da unità centrali per il condizionamento dell'aria esterna e dell'aria di ricircolo, questi impianti possono essere muniti di unità terminali locali.

Appartengono, per esempio, a questa classe i seguenti impianti:

- a portata costante:
 - monocanale;
 - doppio canale, caratterizzati da due canali con aria a due diverse condizioni termoigrometriche, i cui flussi si miscelano in apposite unità terminali a portata costante prima dell'immissione nell'ambiente;

- multizone, in un plenum caldo e in uno freddo vengono generati due flussi, poi miscelati in proporzioni diverse secondo le zone climatiche a cui i flussi arrivano (ad esempio ambienti esposti a nord e altri a sud);
- a portata variabile distinguendo tra:
 - monocanale;
 - doppio canale, caratterizzati da due canali con aria a due diverse condizioni termo igrometriche, i cui flussi si miscelano in apposite unità terminali a portata variabile.
 - multizone, in un plenum caldo e in uno freddo vengono generati due flussi, poi miscelati in proporzioni diverse secondo le zone climatiche a cui i flussi arrivano (ad esempio ambienti esposti a nord e altri a sud) e immessi nell'ambiente con portata variabile;
- *Impianti a post-riscaldamento di zona, con trattamento centralizzato della sola aria esterna e trattamento finale locale, caratterizzati da unità centrali per il pretrattamento dell'aria e unità terminali locali per un trattamento termico differente da ambiente ad ambiente.*

Appartengono, per esempio, a questa classe:

- impianti con terminali con batteria di scambio termico alimentata a due, tre o quattro tubi (ventilconvettori, induttori, ecc.)
- impianti con terminali senza batteria di scambio termico con o senza ventilatore;
- impianti con pannelli radianti.

- *Impianti con trattamento locale, caratterizzati da unità atte al trattamento in ambiente sia dell'aria esterna che dell'aria di ricircolo.*

Appartengono, per esempio, a questa classe:

- unità di trattamento locale dell'aria con presa di aria esterna;
- condizionatori autonomi con presa di aria esterna;
- altri impianti che fanno parte della categoria ma non garantiscono il conseguimento della qualità dell'aria e delle caratteristiche termoigrometriche. Tali sono i:
 - ventilconvettori con presa di aria esterna
 - condizionatori da finestra con presa di aria esterna.

Un altro criterio, per specificare ulteriormente gli impianti di trattamento termico dell'aria è quello di fare riferimento al fluido "termovettore" che dovrà essere riscaldato/raffreddato e opportunamente distribuito in ambiente *indoor*, oltre che convenientemente regolato.

In relazione al fluido vettore si possono distinguere le seguenti principali tipologie impiantistiche:

- impianti ad acqua
- impianti a sola aria (o a tutta aria);
- impianti misti ad aria e acqua;
- impianti a fluido refrigerante.

Gli impianti a tutta aria utilizzano esclusivamente l'aria per fornire energia e massa per il controllo degli ambienti. La regolazione può realizzarsi sia variando la temperatura d'immissione dell'aria (impianti a portata di aria costante) oppure con una variazione della portata di aria (impianti a portata di aria variabile).

Possiamo schematizzare la composizione di questi impianti distinguendo:

- un'unità centrale di condizionamento ove l'aria, può essere stata sottoposta a filtraggio, a riscaldamento e/o raffreddamento, umidificazione o deumidificazione;
- un ventilatore, che spinge l'aria verso la destinazione;
- uno o più canali che trasportano l'aria trattata;

- gli elementi terminali d'impianto (bocchette di mandata) che provvedono a immettere l'aria nei locali.

Gli impianti aria-acqua utilizzano contemporaneamente come fluidi termovettori l'aria (detta primaria) e l'acqua. Consentono di effettuare una regolazione zona per zona riducendo l'ingombro dei canali tipico degli impianti a tutt'aria. L'acqua ha il compito di compensare tutto o in parte il carico termico ma non consente di controllare l'umidità relativa dell'aria interna. Per questo aspetto si ricorre all'aria primaria immessa negli ambienti.

Gli impianti con aria e acqua sono costituiti da due parti distinte: una parte, con circolazione forzata di acqua, servita da una centrale termica e da una centrale frigorifera che inviano l'acqua (calda o fredda) ai ventilconvettori o ai radiatori; l'altra parte d'impianto è costituita da una centrale di trattamento termico dell'aria, anch'essa servita dalle centrali termica e frigorifera, e una rete per la distribuzione dell'aria del tutto simile a quella dell'impianto a tutta aria.

Gli impianti a fluido refrigerante sono principalmente utilizzati per singoli ambienti o per un numero limitato di locali e possono essere costituiti o da unità singole (condizionatori da finestra anche in versione con pompa di calore) comprendenti l'unità frigorifera, la batteria di scambio e l'unità di ventilazione o da impianti detti a "split". Tali impianti sono suddivisi in due parti, un'unità interna (batteria di scambio e unità di ventilazione) e un'unità esterna (unità frigorifera e pompa di calore) al volume da climatizzare.

Un'ulteriore specificazione sugli impianti aeraulici riguarda l'immissione di aria esterna (aria di rinnovo) per assicurare i necessari ricambi di aria, da questo punto di vista gli impianti sono classificati, con ovvio significato, in:

- a totale rinnovo;
- a parziale ricircolo;
- ricircolo totale (in rari casi, quando gli ambienti ad esempio non sono occupati da persone, come magazzini di stoccaggio, ecc.).

Come risulta da quanto, seppur sinteticamente, sopra descritto gli impianti aeraulici presentano una grande varietà di configurazioni e tipologie in funzione degli obiettivi di progetto. Sono compresi sia i semplici ventilatori sia impianti particolarmente complessi in grado di controllare contemporaneamente le velocità, la turbolenza e i ricambi d'aria, nonché la temperatura, il suo gradiente e l'umidità dell'aria *indoor*, affinché venga garantita l'omogeneità e la stazionarietà dei diversi parametri microclimatici entro limiti di comfort.

Definendo la climatizzazione come la realizzazione e il mantenimento simultaneo negli ambienti delle condizioni termiche, igrometriche, di qualità e movimento dell'aria comprese entro i limiti richiesti per il benessere delle persone, sia in riscaldamento che raffreddamento dell'aria, un impianto che fornisca prestazioni ottimali in tutte le situazioni richiede uno sforzo progettuale notevole, la conoscenza delle caratteristiche meteorologiche locali, la destinazione d'uso degli ambienti e la loro distribuzione. Inoltre, deve tener conto che l'alterazione di uno o più parametri microclimatici è in grado di alterare gli altri parametri microclimatici e le relative sensazioni degli occupanti.

Infine gli impianti aeraulici (65) debbono essere progettati e mantenuti in modo da non rappresentare essi stessi una fonte di inquinamento *indoor*, evitando ad esempio sia al suo interno sia in ambiente:

- ristagni di acqua o condense;
- velocità dell'aria in grado di sollevare o distaccare contaminanti;
- immissione di inquinanti dall'esterno;
- reazioni chimiche.

OMOGENEITÀ/STAZIONARIETÀ DEI PARAMETRI MICROCLIMATICI

I concetti di omogeneità e di stazionarietà sono relativi al valor medio e alla fluttuazione, rispetto alla media, dei valori del parametro considerato (T , UR o V_a) rispettivamente nello spazio e nel tempo.

Un indice dell'omogeneità e della stazionarietà è il rapporto tra media e fluttuazioni, entro il quale l'ambiente può ritenersi omogeneo e/o stazionario. Tali fluttuazioni relative sono chiaramente legate alle variazioni del parametro considerato e delle relative sorgenti. Ad esempio a parità di fluttuazione potremmo considerare un ambiente omogeneo per un determinato Composto Organico Volatile (COV) e disomogeneo per un dato agente microbiologico o viceversa. Analoghe considerazioni possono essere applicate alla stazionarietà.

Per esempio, nel caso di edificio dotato di impianto di ventilazione artificiale, c'è una significativa differenza di velocità dell'aria (nello spazio) tra il punto di immissione e i punti posti a distanza da esso. Altrettanto avviene nel tempo, ad esempio nel passaggio da impianto funzionante ad impianto fermo.

In entrambi i casi il numero di misure, i punti di campionamento e il tempo su cui la misura viene mediata andranno determinati in base al contaminante ricercato, alla presunta sorgente, agli obiettivi della misura stessa.

Pertanto, nell'ambito delle indagini sul controllo della qualità dell'aria *indoor*, appare opportuno verificare se, per gli ambienti considerati, i parametri microclimatici, siano misurati contemporaneamente ai campionamenti dei contaminanti ambientali, possano essere considerati stazionari e omogenei, e infine rappresentino al meglio le condizioni che si vogliono analizzare.

In uno stesso ambiente *indoor* si possono avere delle condizioni di omogeneità/disomogeneità e di stazionarietà/non stazionarietà del microclima con le seguenti combinazioni:

- omogeneo-stazionario;
- omogeneo-non stazionario;
- non omogeneo-stazionario;
- non omogeneo-non stazionario.

La possibile variazione temporale e spaziale del microclima, nonché la misura dei parametri T , UR e V_a degli elementi presenti all'interno di un ambiente (ad es. pareti con muffle), deve essere valutata ai fini della scelta sia della posizione degli strumenti di misura dei dati microclimatici che dei campionamenti dei contaminanti ricercati in modo da ottenere dati rappresentativi della specifica sorgente inquinante dell'ambiente di misura. In particolare si dovrà considerare la possibilità di valutare sia le temperature delle superfici dell'involucro dell'ambiente sia di mobilio, di apparecchiature e di impianti presenti all'interno.

Anche differenze di temperature dell'aria dovute alla stratificazione verso l'alto dell'aria più calda dovranno essere esaminate. Si fa generalmente l'ipotesi che la temperatura interna T_a sia costante nei primi 3 m di altezza, mentre per le altezze eccedenti si verifichi un gradiente termico interno $\Delta T / \Delta z$ valutato in funzione della differenza di temperatura tra interno ed esterno $T_a - T_e$, secondo le formule di seguito riportate (57):

- locali di altezza da 3 a 4 m

$$\Delta T / \Delta z = 0,06 \cdot (T_a - T_e) \quad [^{\circ}\text{C/m}]$$

- locali di altezza da 4 a 6 m,

$$\Delta T / \Delta z = 0,05 \cdot (T_a - T_e) \quad [^{\circ}\text{C/m}]$$

- locali di altezza da 6 a 9 m,

$$\Delta T / \Delta z = 0,04 \cdot ([T_a - T_e]) \quad [^{\circ}\text{C/m}]$$

Quindi le temperature di progetto T_p da utilizzarsi come temperatura media nei calcoli termici sono le seguenti:

- pavimento: $T_p = T_a$
- soffitto: $T_p = T_a + \Delta T / \Delta z$
- parete verticali: $T_p = T_a + 0,5 \cdot \Delta T / \Delta z$

Ad esempio per un locale di 8 m di altezza in cui $T_a = 20^{\circ}\text{C}$ e $T_e = -5^{\circ}\text{C}$ si assume che per il pavimento e i primi 3 m delle pareti verticali $T = 20^{\circ}\text{C}$, per gli ultimi 5 m di altezza (da 3 a 8 m) $\Delta T / \Delta z = 1^{\circ}\text{C/m}$, e sul soffitto $T = 25^{\circ}\text{C}$, mentre sulle pareti $T = 22,5^{\circ}\text{C}$.

A questo proposito è opportuno sottolineare che, in un ambiente a temperature ordinarie in cui il vapor d'acqua è omogeneamente distribuito, differenze di qualche unità di $^{\circ}\text{C}$ di temperatura dell'aria o delle superfici comportano variazioni di umidità relativa considerevoli.

Pertanto per eseguire misure microclimatiche rappresentative si dovrà considerare la probabile fonte/sorgente di inquinamento e come una variazione del microclima nello spazio e nel tempo possa influenzare la sorgente stessa (es. una parete con muffa).

In definitiva, per una programmazione delle misure dei parametri microclimatici contestuali alle misure (campionamenti) di contaminanti *indoor* in funzione dell'uso dell'ambiente confinato e delle attività ivi presenti, sono da considerare i seguenti fattori:

- la variabilità dei parametri microclimatici nello spazio (omogeneità) e nel tempo (stazionarietà) durante il periodo di campionamento;
- l'esercizio (funzionamento/non funzionamento) degli impianti di regolazione e controllo del microclima e dei ricambi di aria;
- le condizioni meteo climatiche *outdoor*;
- eventi accidentali che possono generare infiltrazioni di acqua, variazioni di temperature o correnti di aria inconsuete.

INFLUENZA DELL'UMIDITÀ SUGLI INQUINANTI

L'umidità, come ampiamente documentato (50, 67-86), influisce sulla formazione e proliferazione di agenti biologici (funghi, muffe ecc.) in aria, sulle superfici e all'interno dei materiali presenti (rappresentati da arredi, suppellettili e dagli elementi costituenti gli edifici, gli impianti ecc.).

Con cinetiche e meccanismi diversi da caso a caso, il vapore contenuto nell'aria e l'acqua condensata sostituisce, in alcuni substrati adsorbenti o assorbenti, le sostanze già presenti nei materiali favorendone la dispersione nell'aria *indoor*. In altri casi reagisce con le sostanze adsorbite e/o assorbite o costituenti i materiali sia dando luogo a substrati che favoriscono la crescita di agenti biologici, sia costituendo o promuovendo la formazione di ulteriori composti chimici che possono disperdersi sotto forma di gas, vapori o polveri.

Numerose pubblicazioni (71, 77-86) segnalano che la presenza di agenti microbiologici (es. spore di muffe, ecc.) generano composti organici volatili chimici (*Microbial Volatile Organic Compounds*, MVOC) che si aggiunge a quelli già presenti nell'*indoor*. Tuttavia non è ancora chiaro il ruolo di questi COV nei microrganismi; in ogni caso essi sono denominati metaboliti secondari. La ricerca degli MVOC nell'aria *indoor* non è adatta per rilevare i danni provocati da agenti microbiologici negli ambienti *indoor*, infatti i risultati di Schleibinger *et al.* (80) mostrano che c'è una debole associazione tra aree con muffa visibile e presenza di MVOC. Ciò è dovuta alla copresenza di effetti di numerosi altri fattori.

Nel caso dei materiali, le sostanze chimiche precedentemente assorbite od adsorbite possono essere sostituite.

Il fenomeno dell'idrolisi risulta più o meno favorito in funzione dell'umidità presente o della condensa sulle superfici orizzontali e verticali.

Le reazioni chimiche tra le varie sostanze presenti sono condizionate, soprattutto a determinati valori della temperatura dell'aria e della temperatura delle superfici.

I risultati di alcuni studi (87-92) indicano che un valore alto di *UR* può incrementare la velocità di emissione dei COV dai materiali, tuttavia ciò dipende sia dal tipo di materiale che dallo specifico COV e in ogni caso ancora non è chiaro l'influenza dell'umidità relativa sulla diffusione dei COV nei materiali (93).

La formaldeide proveniente da materiali a base di legno è proporzionale all'umidità relativa ad una data temperatura (94). Similmente, la concentrazione di formaldeide cresce all'aumentare dell'umidità relativa all'interno di un intervallo di temperature. Tuttavia si è anche concluso che il tasso di ricambio di aria ha una maggiore influenza sulla concentrazione di inquinanti *indoor* (95). In un altro studio (96) si riscontra che l'umidità relativa non influenza la velocità di emissione specifica del di-(2-etilesil)ftalato da pavimento di materiale vinilico.

L'umidità influisce fortemente sull'aggregazione di particelle solide, sulla formazione e dimensione degli aerosol secondari (97-98) e quindi sulla deposizione.

Da uno studio epidemiologico sulla irritazione occhi è emerso che valori sia bassi (97) che elevati (97-98) di umidità relativa sembrano entrambi far aumentare la deposizione del particolato fine.

Si ricorda inoltre che ci sono complesse correlazioni tra umidità *indoor/outdoor* e temperatura *indoor/outdoor* (59) (vedasi paragrafo Correlazioni Temperatura e umidità).

INFLUENZA DELLA TEMPERATURA DELL'ARIA SUI CONTAMINANTI *INDOOR*

Nel rimandare alla letteratura i risultati dei singoli studi concernenti l'influenza della temperatura (ed umidità relativa) su ciascun inquinante *indoor*, in questa trattazione è importante evidenziare che la temperatura dell'ambiente in generale influenza sia lo sviluppo di agenti microbiologici che di emissioni di COV. Tuttavia c'è da sottolineare che l'intervallo di temperature dell'aria normalmente presenti in ambienti di vita è tipico di temperature moderate e non varia nel corso della giornata in modo significativo. Pertanto l'influenza della temperatura dell'aria nei confronti dell'emissione di agenti chimici e biologici deve essere considerata nell'ambito delle stagioni oppure in ambienti con condizioni di temperatura particolare (ad esempio zone limitrofe a centrali termiche o cabine elettriche, mercati e supermercati, ecc.) o anche in ambienti non controllati termicamente e sensibili alle condizioni climatiche esterne (autorimesse, cantine, soffitte, ecc.).

In un ambiente *indoor* gli agenti biologici possono svilupparsi anche su materiali inerti tipo vetro o ceramica poiché possono ottenere il nutrimento dalle particelle di polvere aerodisperse, le temperature necessarie al loro sviluppo (10÷35°C) sono facilmente riscontrabili all'interno dei luoghi abitati in cui trovano l'umidità relativa ideale per la loro crescita.

Le superfici calde possono generare dei moti convettivi locali tali da risollevarle e disperdere sia particelle sia agenti microbiologici.

Le stesse superfici calde possono favorire reazioni chimiche tra i diversi composti presenti e/o la formazione di prodotti secondari.

È altresì importante considerare l'influenza diretta delle temperature delle superfici sull'*habitat* degli agenti microbiologici nonché indiretta per le modifiche dei valori di umidità nei materiali direttamente influenzati dalla temperatura delle superfici stesse.

Le temperature elevate nonché le eventuali conseguenti escursioni termiche possono accelerare il degrado della coesione dei materiali di cui sono composte sia le superfici riscaldate direttamente sia quelle limitrofe, favorendo l'emissione di inquinanti (materiale particellare, COV, ecc.).

L'influenza della temperatura sugli inquinanti va considerata "caso per caso" ed è necessario distinguere la temperatura dell'aria dalla temperatura delle superfici (arredi, pareti ecc.).

Le emissioni di alcuni COV (87-104) dai materiali sono influenzate dalla temperatura (ed umidità relativa), ma la dipendenza è correlata al tipo di COV emesso. Per molti dei COV emessi, l'effetto della temperatura è modesto o trascurabile se nel range 23÷35°C, mentre è elevato alla temperatura di 60°C. Analoghi risultati sono riportati da altri studi (101-102).

Per la formaldeide è stato dimostrato che la velocità di emissione raddoppia con un incremento di temperatura di 7°C o con un incremento di umidità relativa da 30% a 70% alla temperatura di 22°C (104-107).

INFLUENZA DELL'AERAZIONE/MOVIMENTI DELL'ARIA SUI CONTAMINANTI *INDOOR*

La ventilazione/aerazione (105-106) ha effetti (105-123) sulla concentrazione e distribuzione dei contaminanti in aria e sulle superfici (119), ma anche sull'umidità e sulla temperatura che a loro volta influiscono sugli inquinanti sia di origine chimica che biologica. La ventilazione/ricambio dell'aria, dovrebbe consentire la rimozione e/o diluizione degli inquinanti e dell'umidità generati nell'*indoor*. L'aerazione dal punto di vista quali-quantitativo dovrebbe essere tale da non immettere contaminanti *outdoor* e rimuovere/diluire i contaminanti *indoor*. Tuttavia la carenza di limiti accettabili di concentrazione per tutti gli inquinanti *indoor* non consente di stabilire il numero di ricambi orari minimo richiesto (110).

Velocità dell'aria e flussi di aria localizzata o generale causano il sollevamento/distacco di materiale solido, composto sia da agenti chimici che biologici, da eventuali superfici su cui aderiscono. Correnti di aria eccessive possono pertanto influenzare il rilascio di inquinanti da superfici.

La distribuzione dell'aria nei diversi spazi e ambienti, la tipologia di flusso (laminare, turbolento ecc.), le variazioni delle velocità nel tempo anche in corrispondenza delle superfici presenti, hanno influenze molto significative sugli inquinanti sia di origine chimica che biologica.

Tuttavia l'interazione tra gli inquinanti *indoor* non consente di prevedere e quindi generalizzare l'influenza della ventilazione per ciascun tipo di inquinante. Per esempio la concentrazione del particolato, che influenza il trasporto dei composti organici semivolatili (*SemiVolatiles Organic Compounds*, SVOC), è strettamente dipendente dalla ventilazione. Tuttavia tale dipendenza non è facilmente prevedibile (114).

L'influenza del movimento dell'aria sugli inquinanti va considerato "caso per caso". Per esempio, si è riscontrato che la velocità di emissione dei COV dai materiali (115) è funzione delle condizioni di flusso dell'aria in corrispondenza della superficie del materiale:

- all'aumentare della velocità dell'aria i contaminanti provenienti dai materiali si esauriscono più rapidamente;
- flussi turbolenti hanno un effetto minore sulla velocità di emissione.

Altro esempio è la deposizione del particolato che in base ai risultati di uno studio (117) risulta essere funzione :

- delle condizioni di flusso (laminare o turbolento) nelle vicinanze della superficie di deposizione;
- della rugosità della superficie;
- della concentrazione del particolato stesso.

In particolare:

- per particolato di dimensione $< 0,1 \mu\text{m}$, maggiori velocità di attrito alla superficie e maggiore rugosità possono comportare una maggiore velocità di deposizione del particolato;
- per particolato di dimensioni maggiori (intervallo $1-5 \mu\text{m}$), l'influenza della velocità di attrito e della rugosità potrebbe essere trascurata.

Secondo lo studio di Weschler et al.(118), bassi ricambi di aria portano ad un incremento di formazione e dimensione degli aerosol organici secondari. Lai (119) riporta che nell'*indoor* la deposizione del particolato dipende fortemente dalla sua dimensione raggiungendo un minimo per particelle di dimensioni $0,1-0,3 \mu\text{m}$.

L'andamento della velocità di deposizione in funzione del diametro del particolato risulta essere lo stesso in tutti gli studi effettuati. Tuttavia c'è una significativa differenza (anche di un ordine e più di grandezza) tra i valori di velocità riportati nei singoli studi.

Inoltre, mentre gli approcci sperimentali e teorici mostrano andamenti simili della velocità di deposizione, le stime del modello sono spesso significativamente differenti specialmente per particelle al di sotto di $0,5\ \mu\text{m}$ (121-122).

In definitiva, la deposizione degli inquinanti *indoor* sulle superfici dipende da molti fattori, tra i quali si citano i seguenti:

- layout dell'ambiente;
- regime di flusso dell'aria;
- temperatura dell'aria;
- temperatura della superficie;
- umidità relativa dell'aria interna;
- presenza di condensa sulla superficie;
- tipo di inquinante.

Riguardo al particolato, l'andamento non può essere generalizzato in base alle dimensioni, in quanto è formato da diversi inquinanti e ciascuno con differente origine, composizione e comportamento aerodinamico (124). Infatti, le concentrazioni del particolato nell'*indoor* sono governate dai processi di trasporto e di trasformazione degli inquinanti costituenti il particolato stesso nell'*indoor*, che includono la miscelazione, il trasporto interzonale, la risospensione, la coagulazione e lo scambio di fase. Gli inquinanti sotto forma di gas o aerosol, a seconda delle dimensioni, in generale raggiungono una superficie e si depositano su di essa attraverso vari meccanismi (125-130) (quali ad esempio diffusione molecolare browniana, termoforesi, gravità ecc.) che generalmente si svolgono simultaneamente con preponderanza dell'uno o l'altro meccanismo a seconda delle condizioni di temperatura, umidità e condense presenti.

MONITORAGGIO DELL'ARIA *INDOOR* E DEI PARAMETRI MICROCLIMATICI

Il monitoraggio dei parametri microclimatici in un ambiente di misura, finalizzato ad interpretare i livelli di concentrazione degli inquinanti, richiede che siano chiari gli obiettivi della misura delle concentrazioni degli inquinanti e i tipi di inquinanti da indagare.

In generale, le attività di monitoraggio di inquinanti in ambienti *indoor* vengono principalmente condotte per i seguenti scopi:

- 1) rispondere ai reclami presentati dai fruitori degli ambienti;
- 2) condurre attività di sorveglianza a seguito di situazioni accertate di inquinamento;
- 3) condurre attività di sorveglianza per valutare l'efficacia di un eventuale rimedio adottato;
- 4) eseguire la raccolta di specifiche informazioni per agevolare i processi decisionali in sede di valutazione dell'esposizione della popolazione con riferimento ai diversi tempi di permanenza in un dato ambiente;
- 5) verificare il rispetto di valori guida stabiliti dalle autorità competenti.

Lo scopo del monitoraggio ambientale è in generale la valutazione della qualità dell'aria in funzione del microclima dell'ambiente sottoposto ad analisi; pertanto è importante selezionare *ad hoc* i parametri che devono essere misurati e monitorati. In generale, il microclima è individuato attraverso i dati relativi alla temperatura, umidità relativa e ricambi di aria, tuttavia, come già detto, l'ambiente *indoor* non è isolato, pertanto solo l'osservazione e l'acquisizione dei dati del contesto territoriale nel quale è collocato l'organismo edilizio cui appartiene "l'ambiente *indoor* di misura" e l'organismo edilizio stesso possono indirizzare la scelta dei parametri da monitorare.

Nell'appendice B viene riportato uno schema esemplificativo di organismo edilizio che può essere di aiuto per organizzare il monitoraggio in base ad un inquadramento "dell'ambiente *indoor* di misura" con i fattori che possono influire, quali:

- caratteristiche riconducibili all'ambito insediativo/contesto territoriale nel quale è collocato l'organismo edilizio cui appartiene "l'ambiente *indoor* di misura";
- caratteristiche riconducibili all'organismo edilizio cui appartiene;
- caratteristiche "dell'ambiente *indoor* di misura".

L'Appendice B riporta inoltre, ad integrazione di quanto già evidenziato nell'Appendice A del Rapporto ISTISAN 13/4 (131), alcuni elementi per l'individuazione degli accertamenti preliminari da effettuare, quali:

- raccolta di informazioni rilevanti per gli obiettivi dell'indagine, attraverso appositi questionari per un corretto inquadramento dell'organismo edilizio e/o edificio e dell'ambiente di misura per una corretta programmazione del monitoraggio;
- ispezioni dell'ambiente con accertamenti visivi (es. di crepe, di muffe visibili) sia a livello di edificio che di "ambiente di misura";
- misure di screening;
- informazioni da acquisire e registrare in fase di ispezioni e durante il monitoraggio.

In generale, la complessità e la variabilità dei fattori che interagiscono in ambiente *indoor* richiederebbero monitoraggi di almeno un anno, e continuativi. In questo modo la descrizione del microclima di un ambiente *indoor*, sia in termini di inquinanti che di parametri termogrometrici, si basa su dati rappresentativi che permettono di valutare le condizioni e le fluttuazioni delle condizioni microclimatiche e degli inquinanti nelle 24 ore, nel mese, nella stagione e nell'anno.

Nel caso in cui non è possibile effettuare misure, per dei parametri microclimatici misure, in continuo per tutto il periodo di misura stabilito, i rilevamenti discontinui andrebbero effettuati in modo da ottenere dati almeno lungo un mese per ogni stagione, in condizioni diurne e notturne e nei periodi con caratteristiche climatiche significative per l'ambiente in studio.

In generale, in caso di rilevamenti discontinui, il monitoraggio deve essere realizzato in maniera tale da acquisire dati che possano fornire tutte le indicazioni necessarie e fondamentali per l'interpretazione dei risultati sia del microclima che degli inquinanti monitorati.

Numero e localizzazione dei punti di rilevamento sono dettati principalmente dal caso oggetto del monitoraggio. In generale, è preferibile effettuare diverse misurazioni, in punti strategici all'interno ed esterno dell'organismo edilizio e dell'ambiente di misura, al fine di confrontare i dati e valutare l'influenza dei valori esterni dei parametri su quelli che si registrano tra gli interni.

Inoltre, come noto, la posizione del campionatore dell'inquinante all'interno di un ambiente influenza fortemente la misura e quindi i risultati. Pertanto il rilevamento delle misure dei parametri microclimatici deve avvenire in modo da rappresentare il microclima dell'aria campionata.

Da Si deve tener conto dei possibili gradienti di temperatura, pressione e velocità dell'aria che si possono verificare nell'ambito dell'ambiente di misura. Tali gradienti sono dovuti a diverse situazioni: volume e area dell'ambiente confinato, scambi termici interni, scambi termici con l'*outdoor*, ecc.

Per una migliore interpretazione dei risultati dell'analisi dei contaminanti dell'aria *indoor* campionata, si dovrà considerare la probabile fonte/sorgente di inquinamento e l'influenza sulla sorgente stessa della come una variazione dei parametri microclimatici nello spazio e nel tempo possa influenzare la sorgente stessa (es. una parete con muffa).

In definitiva, per le misure dei parametri microclimatici contestuali ai campionamenti di contaminanti *indoor* in funzione dell'uso dell'ambiente confinato e attività ivi presenti, sono da considerare i seguenti fattori:

- la variabilità dei parametri microclimatici nello spazio (omogeneità) e nel tempo (stazionarietà) durante il periodo di campionamento;
- l'esercizio (funzionamento/non funzionamento) degli impianti di regolazione e controllo del microclima e dei ricambi di aria;
- condizioni meteo climatiche *outdoor*;
- eventi accidentali che generano:
 - infiltrazioni di acqua,
 - variazioni di temperature
 - correnti di aria inconsuete.

È fondamentale considerare che processi di ventilazione, infiltrazione, intrusione di aria producono un costante scambio tra l'aria *outdoor* e l'aria *indoor*; pertanto è importante effettuare in intervalli rappresentativi di tempo le stesse misure di T , V_{aria} e UR all'esterno (dell'aria *outdoor*). Tali misure devono essere effettuate nelle vicinanze dell'edificio ad una distanza e altezza di possibile influenza sugli inquinanti investigati. Inoltre se l'edificio oggetto d'indagine è dotato di sistemi di ventilazione, la misura della T va effettuata in modo tale da tener conto del punto di immissione dell'aria in considerazione del fatto che si possono avere temperature e umidità diverse a seconda delle differenze microclimatiche tra *indoor* e *outdoor*. Da considerare che mentre nell'*indoor* l' UR può variare velocemente e notevolmente (es. a causa del ventilatore acceso, delle attività che generano umidità ecc.), nell'*outdoor* si hanno variazioni più lente dovute a variazioni meteo-climatiche.

La presenza di inquinanti in ambienti *indoor* è notevolmente influenzata dalle caratteristiche tecnologiche e costruttive degli ambienti, dalle condizioni microclimatiche, dai ricambi di aria,

dall'attività svolta e dalle sorgenti presenti (132). È opportuno pertanto avere informazioni di dettaglio circa le caratteristiche strutturali degli ambienti (dimensioni, presenza di porte, finestre, caratteristiche degli infissi, ecc.) e la loro destinazione d'uso. Infatti, a parità di sorgenti *indoor* e *outdoor*, la diffusione o il ristagno degli inquinanti nell'ambiente, la loro reattività chimica e la potenziale interazione con le superfici (materiali edili, arredi, ecc.), dipendono unicamente da fattori che influenzano l'aerodinamica all'interno degli ambienti. Pertanto è opportuno monitorare gli andamenti temporali dei principali parametri microclimatici come la velocità dell'aria, la temperatura ambiente e l'umidità relativa. Parimenti occorre conoscere la frequenza dei ricambi di aria, gli scambi tra *indoor* e *outdoor* e la presenza/attività degli occupanti. Tali informazioni possono essere ricavate o dalla compilazione di opportuni questionari da parte degli stessi occupanti.

In conclusione, per i campionamenti degli inquinanti sia chimici che biologici è fondamentale tener conto di:

- omogeneità/stazionarietà dei parametri microclimatici;
- clima *outdoor* con le sue variazioni (temperatura, umidità, irraggiamento solare, vento, ecc.) di breve, medio e lungo termine;
- caratteristiche dell'ambiente esterno in grado di influenzare le interazioni dirette tra parametri microclimatici e climatici;
- caratteristiche tecnologiche e costruttive dell'ambiente in esame (architettura, materiali e prodotti impiegati, impianti di controllo del microclima, ecc.);
- uso degli ambienti: attività e presenza che incidono sui valori e variabilità dei parametri microclimatici;
- scambi termici che avvengono con l'esterno;
- scambi termici tra l'ambiente interno e gli elementi ivi presenti.

BIBLIOGRAFIA

1. Maciejewska M, Szczurek A, Sikora G, Wylomańska A. Diffusive and subdiffusive dynamics of indoor microclimate: A time series modeling. *Phys Rev E* 2012;86:031128.
2. Wong LT, Mui KW, Hui PS. A statistical model for characterizing common air pollutants in air-conditioned offices. *Atmos Environ* 2006;40(23):4246-57.
3. Santarsiero A, Fuselli S. Indoor and outdoor air carbonyl compounds correlation elucidated by principal component analysis. *Environ Res* 2008;106:139-47.
4. Santarsiero A, Fuselli S, Morlino R, Minniti G, De Felice M, Ortolani E. Air pollution/working activity correlation: a case study in a dental hospital. *Int J Environ Health Res* 2011;21(1):22-40.
5. Santarsiero A, Fuselli S, Piermattei A, Morlino R, De Blasio G, De Felice M, Ortolani E. Investigation of indoor air volatile organic compounds concentration levels in dental settings and some related methodological issues. *Ann Ist Super Sanità* 2009; 45(1):87-98.
6. Santarsiero A, Fuselli S (Ed.). *Convegno nazionale. Inquinamento indoor residenziale-abitazione e qualità dell'aria. Istituto Superiore di Sanità, Roma, 9 ottobre 2009. Riassunti*. Roma: Istituto Superiore di Sanità; 2009. (ISTISAN Congressi 09/C7).
7. Santarsiero A, Fuselli S, Morlino R, Minniti G, De Felice M, Ortolani E. Indagine sui composti organici volatili nell'aria indoor/outdoor di un presidio odontoiatrico. In: Fuselli S, Musmeci L, Pilozi A, Santarsiero A, Settimo G per il Gruppo di Studio Nazionale sull'Inquinamento Indoor (Ed.). *Workshop. Problematiche relative all'inquinamento indoor: attuale situazione in Italia. Istituto Superiore di Sanità. Roma, 25 giugno 2012. Atti*. Roma: Istituto Superiore di Sanità; 2013. (Rapporti ISTISAN 13/39). p 76-84.
8. Santarsiero A, Fuselli S, Morlino R, De Felice M, Ortolani E. Sorgenti indoor del metilmetacrilato in un presidio odontoiatrico. In: Santarsiero A, Musmeci L, Fuselli S, per il Gruppo di Studio Nazionale sull'Inquinamento Indoor (Ed.). *Workshop. La qualità dell'aria indoor: attuale situazione nazionale e comunitaria. L'esperienza del gruppo di studio nazionale inquinamento indoor. Istituto Superiore di Sanità. Roma, 28 maggio 2014. Atti*. Roma: Istituto Superiore di Sanità; 2015. (Rapporti ISTISAN 15/4).
9. UNI EN ISO 7726. *Ergonomia degli ambienti termici - Strumenti per la misurazione delle grandezze fisiche*. Milano: Ente Nazionale Italiano di Unificazione; 2002.
10. UNI EN 16242. *Conservazione dei beni culturali - Procedure e strumenti per misurare l'umidità dell'aria e gli scambi di vapore tra l'aria e i beni culturali*. Milano: Ente Nazionale Italiano di Unificazione; 2013.
11. UNI EN 15758. *Conservazione dei Beni Culturali - Procedure e strumenti per misurare la temperatura dell'aria e quella della superficie degli oggetti*. Milano: Ente Nazionale Italiano di Unificazione; 2010.
12. Italia. Accordo tra il Ministro della salute, le regioni e le province autonome sul documento concernente: "Linee-guida per la tutela e la promozione della salute negli ambienti confinati". *Gazzetta Ufficiale Serie Generale* n.276 - *Supplemento Ordinario* n. 252, del 27/11/2001.
13. Italia. Accordo del 18 novembre 2010 n. 124, emanato dalla Conferenza Unificata, ai sensi dell'articolo 9 del decreto legislativo 27 agosto 1997, n. 281, tra Governo, regioni, province autonome di Trento e Bolzano, province, comuni e comunità montane concernente «Linee di indirizzo per la prevenzione nelle scuole dei fattori di rischio indoor per allergie e asma». *Gazzetta Ufficiale Serie Generale* n. 9 del 13/01/ 2011.

14. Santarsiero A. *Aspetti igienico-sanitari, tecnici e normativi nell'edilizia cimiteriale: valutazione preliminare del calcestruzzo aerato autoclavato in sostituzione dei materiali previsti dal DPR 285/1990*. Roma: Istituto Superiore di Sanità; 2013. (Rapporti ISTISAN 13/22).
15. Blondeau P, Tiffonnet AL, Damian A, Amiri O, Molina JL. Assessment of contaminant diffusivities in building materials from porosimetry tests. *Indoor Air* 2003;13(3):310-8.
16. Bear J, Bachmat Y. Introduction to modeling of transport phenomena in porous media. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers; 1991.
17. Lee CS, Haghighat F, Ghaly WS. A study on VOC source and sink behavior in porous building materials- analytical model development and assessment. *Indoor Air* 2005;15(3):183-96.
18. De Biase C, Loechel S, Putzmann T, Bittens M, Weiss H, Daus B Volatile organic compounds effective diffusion coefficients and fluxes estimation through two types of construction material. *Indoor Air* 2014;24(3): 272-82.
19. UNI 10351. *Materiali da costruzione. Conduttività termica e permeabilità al vapore*. Milano: Ente Nazionale Italiano di Unificazione; 1994.
20. UNI EN 12524. *Materiali e prodotti per edilizia – Proprietà igrometriche- Valori tabulati e di progetto*. Milano: Ente Nazionale Italiano di Unificazione; 2001.
21. UNI EN ISO 10456. *Materiali e prodotti per edilizia - Proprietà igrometriche - Valori tabulati di progetto e procedimenti per la determinazione dei valori termici dichiarati e di progetto*. Milano: Ente Nazionale Italiano di Unificazione; 2008.
22. UNI EN ISO 6946. *Componenti ed elementi per edilizia - Resistenza termica e trasmittanza termica - Metodo di calcolo*. Milano: Ente Nazionale Italiano di Unificazione; 2008.
23. UNI EN ISO 7345. *Isolamento termico - Grandezze fisiche e definizioni*. Milano: Ente Nazionale Italiano di Unificazione; 1999.
24. Italia. Decreto Legislativo 19 agosto 2005, n. 192. Attuazione della direttiva 2002/91/CE relativa al rendimento energetico nell'edilizia. *Gazzetta Ufficiale* n. 222 del 23/ 11/2005 - *Supplemento Ordinario* n. 158
25. Italia. Decreto Legislativo 29 dicembre 2006, n. 311. Disposizioni correttive e integrative al decreto legislativo 19 agosto 2005, n. 192, recante attuazione della direttiva 2002/91/CE, relativa al rendimento energetico nell'edilizia. *Gazzetta Ufficiale* n. 26 del 01/02/ 2007 - *Supplemento Ordinario* n. 26/L.
26. Italia. 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. *Gazzetta Ufficiale* n.132 del 10-6-2009.
27. Italia. Decreto Ministeriale 26 giugno 2009- Ministero dello Sviluppo Economico. Linee guida nazionali per la certificazione energetica degli edifici. *Gazzetta Ufficiale* n. 158 del 10/07/ 2009.
28. UNI EN ISO 13788. *Prestazione igrotermica dei componenti e degli elementi per edilizia - Temperatura superficiale interna per evitare l'umidità superficiale critica e condensazione interstiziale - Metodo di calcolo*. Milano: Ente Nazionale Italiano di Unificazione; 2013.
29. UNI/TS 11300-1. *Prestazioni energetiche degli edifici - Parte 1: Determinazione del fabbisogno di energia termica dell'edificio per la climatizzazione estiva e invernale*. Milano: Ente Nazionale Italiano di Unificazione; 2014.
30. UNI/TS 11300-2. *Prestazioni energetiche degli edifici - Parte 2: Determinazione del fabbisogno di energia primaria e dei rendimenti per la climatizzazione invernale, per la produzione di acqua calda sanitaria, per la ventilazione e per l'illuminazione in edifici non residenziali*. Milano: Ente Nazionale Italiano di Unificazione; 2014.

31. UNI EN ISO 13786. *Prestazione termica dei componenti per edilizia Caratteristiche termiche dinamiche - Metodi di calcolo*. Milano: Ente Nazionale Italiano di Unificazione; 2008.
32. Italia. Decreto Legislativo 19 agosto 2005, n. 192. Attuazione della direttiva 2002/91/CE relativa al rendimento energetico nell'edilizia. *Gazzetta Ufficiale* n. 222 del 23/09/ 2005.
33. Italia. Decreto del Presidente della Repubblica 26 agosto 1993, n. 412. Regolamento recante norme per la progettazione, l'installazione, l'esercizio e la manutenzione degli impianti termici degli edifici ai fini del contenimento dei consumi di energia, in attuazione dell'art. 4, comma 4, della legge 9 gennaio 1991, n. 10. *Gazzetta Ufficiale -Serie Generale* n.242 del 14/10/1993. Supplemento Ordinario n. 96.
34. UNI 10349. *Riscaldamento e raffrescamento degli edifici - Dati climatici*. Milano: Ente Nazionale Italiano di Unificazione; 1994.
35. UNI EN ISO 14683. *Ponti termici in edilizia - Coefficiente di trasmissione termica lineica - Metodi semplificati e valori di riferimento*. Milano: Ente Nazionale Italiano di Unificazione; 2008.
36. UNI EN13790. *Prestazione energetica degli edifici - Calcolo del fabbisogno di energia per il riscaldamento e il raffrescamento*. Milano: Ente Nazionale Italiano di Unificazione; 2008.
37. UNI EN ISO 13731. *Ergonomia degli ambienti termici – Vocabolario e simboli*. Milano: Ente Nazionale Italiano di Unificazione; 2004
38. Santarsiero A (Ed.). *Conference. Dental setting as it stands with current procedures, materials and substances in use and related environment (indoor air quality). Rome, Italy, 14 June, 2008. Abstract Book*. Roma: Istituto Superiore di Sanità; 2008. (ISTISAN Congressi 08/C4).
39. Weschler CJ. Chemistry in indoor environments: 20 years of research. *Indoor Air* 2011;21(3):205-18.
40. Weschler CJ. Ozone in indoor environments: concentration and chemistry. *Indoor Air* 2000;10 (4):269-88.
41. Springs M, Wells JR, Morrison GC. Reaction rates of ozone and terpenes adsorbed to model indoor surfaces. *Indoor Air* 2011;21(4):319-27.
42. Petrick L, Dubowski Y. Heterogeneous oxidation of squalene film by ozone under various indoor conditions. *Indoor Air* 2009;19 (5): 381-91.
43. Wells JR. Gas-phase chemistry of α -terpineol with ozone and OH radical: rate constants and products. *Environ Sci Technol* 2005;39 (18):6937-43.
44. Uhde E, Salthammer T. Impact of reaction products from building materials and furnishings on indoor air quality—A review of recent advances in indoor chemistry. *Atmos Environ* 2007;41:3111-28.
45. Destailats H, Lunden MM, Singer BC, Coleman BK, Hodgson AT, Weschler CJ, Nazaroff WW. Indoor secondary pollutants from household product emissions in the presence of ozone: a bench-scale chamber study. *Environ Sci Technol* 2006;40:4421-8.
46. Morrison GC, Nazaroff WW. Ozone interactions with carpet: secondary emissions of aldehydes. *Environ Sci Technol* 2002;36:2185-92.
47. Weschler CJ. Reactions among indoor pollutants: What's new? *ScientificWorld Journal* 2001; 1: 443-57.
48. Weschler CJ. Chemical reactions among indoor pollutants: what we've learned in the new millennium. *Indoor Air* 2004;14(Suppl 7):184-94.
49. Fick J, Pommer L, Andersson B, Nilsson C. A study of the gas phase ozonolysis of terpenes: the impact of radicals formed during the reaction. *Atmos Environ* 2002;36:3299-308.
50. World Health Organization. *WHO guidelines for indoor air quality: dampness and mould*. Copenhagen: WHO Regional Office for Europe; 2009.

51. Green DW, Perry RH. *Perry's chemical engineers' handbook*. Eighth edition. New York: McGraw-Hill; 2008.
52. Zhang Z, Pate MB. A methodology for Implementing a psychrometric chart in a computer graphics system. *ASHRAE Transactions* 1988;94 (Pt.1):2069.
53. UNI EN ISO 10211. *Ponti termici in edilizia - Flussi termici e temperature superficiali - Calcoli dettagliati*. Milano: Ente Nazionale Italiano di Unificazione; 2008.
54. Budaiwi I, El-Diasty R, Abdou A. Modelling of moisture and thermal transient behaviour of multilayer non-cavity walls. *Build and Environ* 1999;34:537-51.
55. De Freitas VP, Abrantes V, Crausse P. Moisture migration in building walls- analysis of the interface phenomena. *Build and Environ* 1996;31(2):99-108.
56. UNI 10350. *Componenti edilizi e strutture edilizie - Prestazioni igrotermiche - Stima della temperatura interna*. Milano: Ente Nazionale Italiano di Unificazione; 1999.
57. Bettanini E, Brunello PF. *Lezioni di impianti tecnici*. Padova: CLEUP; 1991.
58. Giaccone A, Rizzo G. *La progettazione termica degli edifici con il personal computer*. Milano: Franco Angeli Editore; 1987.
59. Nguyen JL, Schwartz J, Dockery DW. The relationship between indoor and outdoor temperature, apparent temperature, relative humidity, and absolute humidity. *Indoor Air* 2014;24(1):103-12.
60. Swami MV, Chandra S. Correlations for pressure distribution on buildings and calculation of natural ventilation airflow. *ASHRAE Transactions* 1988;94(1):243-66.
61. Seifert J, Li Y, Axley J, Rosler M. Calculation of wind-driven cross ventilation in buildings with large openings. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 2006;94(12):925-47.
62. Cheung JOP, Liu C-H. CFD simulations of natural ventilation behaviour in high-rise buildings in regular and staggered arrangements at various spacings. *Energ Buildings* 2011;43(5):1149-58.
63. Guohui G. Effective depth of fresh air distribution in rooms with single-sided natural ventilation. *Energ Buildings* 2000;31:65-73.
64. Visagavel K, Srinivasan PSS. Analysis of single side ventilated and cross ventilated rooms by varying the width of the window opening using CFD. *Solar Energy* 2009; 83:2-5.
65. Coordinamento tecnico interregionale della prevenzione nei luoghi di lavoro. *Microclima, aerazione e illuminazione nei luoghi di lavoro. Requisiti e standard. Indicazioni operative e progettuali. Linee Guida*. Roma: ISPESL; 2006. Disponibile all'indirizzo: http://www.ispesl.it/linee_guida/tecniche/LGMicroClima062006.pdf; ultima consultazione 18/2/2015.
66. UNI 10339. *Impianti aeraulici al fini di benessere. Generalità, classificazione e requisiti. Regole per la richiesta di offerta, di ordine e la fornitura*. Milano: Ente Nazionale Italiano di Unificazione; 1995.
67. Nilsson A, Kihlström E, Lagesson V, Wessén B, Szponar B, Larsson L, Tagesson C. Microorganisms and volatile organic compounds in airborne dust from damp residences. *Indoor Air* 2004;14(2):74-82.
68. Andersen B, Frisvad JC, Søndergaard I, Rasmussen I, Larsen LS. Associations between fungal species and water-damaged building materials. *Appl Environ Microbiol* 2011;77(12):4180-8.
69. Thrasher JD, Crawley S. The biocontaminants and complexity of damp indoor spaces: more than what meets the eyes. *Toxicol Ind Health* 2009;25(9-10):583-615.
70. Korpi A, Järnberg J, Pasanen AL. Microbial volatile organic compounds. *Crit Rev Toxicol* 2009;39(2):139-93.
71. Claeson AS, Levin JO, Blomquist G, Sunesson AL. Volatile metabolites from microorganisms grown on humid building materials and synthetic media. *J Environ Monit* 2002;4:667-72.

72. Bjurman J, Nordstrand E, Kristensson J. Growth-Phase-related production of potential volatile-organic tracer compounds by moulds on wood. *Indoor Air* 1997;7(1):2-7.
73. Bjurman J, Kristensson J. Production of volatile metabolites by the soft rot fungus *Chaetomium globosum* on building materials and defined media. *Microbios* 1992;72:47-54.
74. Verdiera T, Coutanda M, Bertrona A, Roquesb C. A review of indoor microbial growth across building materials and sampling and analysis methods. *Build Environ* 2014;80:136-49.
75. Johansson P, Svensson T, Ekstrand-Tobin A. Validation of critical moisture conditions for mould growth on building materials. *Build Environ* 2013;62:201-9.
76. Gao P, Korley F, Martin J, Chen B T. Determination of unique microbial volatile organic compounds produced by five *Aspergillus* species commonly found in problem buildings. *AIHA J* 2002; 63:135-40.
77. Kiviranta H, Tuomainen A, Reiman M, Laitinen S, Liesivuori J, Nevalainen A. Qualitative identification of volatile metabolites from two fungi and three bacteria species cultivated on two media. *Cent Eur J Public Health* 1998;6:296-9.
78. Korpi A, Pasanen A-L, Viitanen H. Volatile metabolites of *Serpula lacrymans*, *Coniophora puteana*, *Poria placenta*, *Stachybotrys chartarum* and *Chaetomium globosum*. *Build Environ* 1998; 34:205-11.
79. Magan N, Evans P. Volatiles as an indicator of fungal activity and differentiation between species, and the potential use of electronic nose technology for early detection of grain spoilage. *J Stored Prod Res* 2000; 3:319-40.
80. Schleibinger H, Laußmann D, Brattig C, Mangler M, Eis D, Rüdén H. Emission patterns and emission rates of MVOC and the possibility for predicting hidden mould damage. *Indoor Air* 2005, 15(9):98-104.
81. Sunesson AL, Vaes WHJ, Nilsson CA, Blomquist G, Andersson B, Carlson R. Identification of volatile metabolites from five fungal species cultivated on two media. *Appl Environ Microbiol* 1995;61:2911-8.
82. Sunesson AL, Nilsson CA, Andersson B, Blomquist G. Volatile metabolites produced by two fungal species cultivated on building materials. *Ann Occup Hyg* 1996;40:397-410.
83. Wilkins K, Larsen K. Variation of volatile organic compound patterns of mold species from damp buildings. *Chemosphere* 1995;31:3225-36.
84. Wilkins K, Larsen K, Simkus, M. Volatile metabolites from mold growth on building materials and synthetic media. *Chemosphere* 2000;41:437-46.
85. Wolkoff P, Kjærgaard SK. The dichotomy of relative humidity on indoor air quality. *Environ Int* 2007;33:850-57.
86. Schleibinger H, Laussmann D, Bornehag C-G, Eis D, Rueden H. Microbial volatile organic compounds in the air of moldy and mold-free indoor environments. *Indoor Air* 2008;18(2):113-24.
87. Wolkoff P. Impact of air velocity, temperature, humidity, and air on long-term VOC emissions from building products. *Atmos Environ* 1998;32:2659-68.
88. Fang L, Clausen G, Fanger PO. Impact of temperature and humidity on chemical and sensory emissions from building materials. *Indoor Air* 1999;9:193-201.
89. Zhang J, Zhang JS, Chen Q. Effects of environmental conditions on the VOC sorption by building materials-part I: experimental results. *ASHRAE Transactions* 2002; 108:273-82.
90. Huang H, Haghighat F, Blondeau P. Volatile organic compound (VOC) adsorption on material: influence of gas phase concentration, relative humidity and VOC type. *Indoor Air* 2006;16:236-47.

91. Farajollah Y, Chen Z, Haghighat F. An experimental study for examining the effects of environmental conditions on diffusion coefficient of VOCs in building materials. *Clean Soil Air Water* 2009;37: 436-43.
92. Bouilly CR, Allard F, Blondeau P, Collignan B, Popescu R, Sjoberg A. A physically-based analysis of the interactions between humidity and VOCs in building materials. *Proceedings of Healthy Buildings* 2006;4:89-94.
93. Xu J, Zhang JS. An experimental study of relative humidity effect on VOCs' effective diffusion coefficient and partition coefficient in a porous medium. *Build Environ* 2011;46(9):1785-96.
94. Van Netten C, Shirlcliffe C, Svec J. Temperature and humidity dependence of formaldehyde release from selected building materials. *Bull Environ Contam Toxicol* 1989;42:558-65.
95. Salthammer T, Fuhrmann F, Kaufhold S, Meyer B, Schwarz A. Effects of climatic parameters on formaldehyde concentrations in indoor air. *Indoor Air* 1995;5:120-8.
96. Clausen P A, Xu Y, Kofoed-Sørensen V, Little JC, Wolkoff P. The influence of humidity on the emission of di-(2-ethylhexyl) phthalate (DEHP) from vinyl flooring in the emission cell "FLEC" *Atmos Environ* 2007;41(15):3217-24.
97. Litvak A, Gadgil AJ, Fisk WJ. Hygroscopic fine mode particle deposition on electronic circuits and resulting degradation of circuit performance: an experimental study. *Indoor Air* 2000;10:47–56.
98. Miguel AF, Reis AH, Aydin M. Aerosol particle deposition and distribution in bifurcating ventilation ducts. *J Hazard Mater* 2004;116:249–55.
99. Fromme H, Twardella D, Dietrich S, Heitmann D, Schierl R, Liebl B, Ruden H. Particulate matter in the indoor air of classrooms-exploratory results from Munich and surrounding area. *Atmos Environ* 2007;41:854-66.
100. Seifert B, Ullrich D, Nagel R. Volatile organic compounds from carpeting. In: Brasser LJ, Mulder WC (Ed.). *Man and his ecosystem. Proceedings of the 8th World Clean Air Congress. The Hague (Netherlands), 1989*. Amsterdam: Elsevier Editor; 1989. p. 253-8.
101. Van der Wal JF, Hoogeveen AW, Wouda P. The Influence of temperature on the emission of volatile organic compounds from PVC flooring, carpet, and paint. *Indoor Air* 1997;7:215-21.
102. Sollinger S, Levsen K, Wünsch G. Indoor air pollution by organic emissions from textile floor coverings. Climate chamber studies under static conditions. *Atmos Environ* 1994; 28: 2369-78.
103. Andersen I, Lundquist G, Mølhave L. Indoor air pollution due to chipboard used as a construction material. *Atmos Environ* 1975;9:1121-27.
104. Zhang Y, Luo X, Wang X, Qian K, Zhao R. Influence of temperature on formaldehyde emission parameters of dry building materials. *Atmos Environ* 2007;41(15): 3203-16.
105. Cao G, Awbi H, Yao R, FanY, SirénK, Kosonen R, Zhang JJ. A review of the performance of different ventilation and airflow distribution systems in buildings. *Build Environ* 2014;73:171-86.
106. Das P, Chalabi Z, Jones B, Milner J, Shrubsole C, Davies M, Hamilton I, Ridley I, Wilkinson P. Multi-objective methods for determining optimal ventilation rates in dwellings. *Build Environ* 2013;66:72-81.
107. Park JS, Jee N-Y, Jeong J-W. Effects of types of ventilation system on indoor particle concentrations in residential buildings. *Indoor Air* 2014;24(6):629-38.
108. Smedje G, Mattsson M, Wålander R. Comparing mixing and displacement ventilation in classrooms: Pupils' perception and health. *Indoor Air* 2011;21:454-61.
109. Sundell J, Levin H, Nazaroff WW, Cain WS, Fisk WJ, Grimsrud DT, Gyntelberg F, LiY, Persily AK, Pickering AC, Samet J M, Spengler JD, Taylor ST, Weschler CJ. Commemorating 20years of

- indoor air. Ventilation rates and health: multidisciplinary review of the scientific literature. *Indoor Air* 2011;21(3):191-204.
110. Dimitroulopoulou C. Ventilation in European dwellings: a review. *Build Environ* 2012;47:109-25.
 111. Seppänen OA, Fisk WJ. Summary of human responses to ventilation. *Indoor Air* 2004;14(s7):102-18.
 112. Alshitawi M, Awbi H, Mahyuddin N. Particulate matter mass concentration (PM10) under different ventilation methods classrooms. *Int.J.Vent.* 2009;8:93-108.
 113. Chen C, Zhao B. Review of relationship between indoor and outdoor particles: I/O ratio, infiltration factor and penetration factor. *Atmos. Environ* 2011;45:275-88.
 114. Liu C, Zhang Y, Benning JL, Little JC. The effect of ventilation on indoor exposure to semivolatile organic compounds. *Indoor Air* 2014; doi: 10.1111/ina.12139.
 115. Salimi F, Mazaheri M, Clifford S, Crilley LR, Laiman R, Morawska L. Spatial variation of particle number concentration in school microscale environments and its impact on exposure assessment. *Environ Sci Technol* 2013;47:5251-58.
 116. Zhang Y, Haghighat F. The impact of surface air movement on material emissions. *Build Environ* 1997; 32(6):551-6.
 117. Zhao B, Wu J. Particle deposition in indoor environments: Analysis of influencing factors. *J Hazard Mater* 2007;147(1-2): 439-48.
 118. Weschler CJ, Shieldsc HC. Experiments probing the influence of air exchange rates on secondary organic aerosols derived from indoor chemistry. *Atmos Environ* 2003;37(39-40):5621-31.
 119. Lai ACK. Particle deposition indoors: a review. *Indoor Air* 2002;12:211-4.
 120. Morawska L, Salthammer T. Fundamentals of indoor particles and settled dust. In: Morawska L, Salthammer T (Ed.). *Indoor environment: airborne particles and settled dust*. Weinheim, Germany: Wiley-VCH. 2003. p. 3-46.
 121. He C, Morawska L, Gilbert D. Particle deposition rates in residential houses. *Atmos Environ* 2005; 39: 3891-99.
 122. Meininghaus R, Gunnarsen L, Knudsen HN. Diffusion and sorption of volatile organic compounds in building materials—impact on indoor air quality. *Environ Sci Technol* 2000;34(15):3101-8.
 123. Guo H, Morawska L, He C, Gilbert D. Impact of ventilation scenario on air exchange rates and on indoor particle number concentrations in an air-conditioned classroom. *Atmos Environ* 2008;42:757-68.
 124. Nazaroff W. Indoor particle dynamics. *Indoor Air* 2004;14(s7):175-83.
 125. Hussein T, Kubincová L, Džumbová L, Hruška A, Dohányosová P, Hemerka J, Smolík J. Deposition of aerosol particles on rough surfaces inside a test chamber. *Build Environ* 2009;44 (10):2056-63.
 126. Lai ACK. Investigation of electrostatic forces on particle deposition in a test chamber. *Indoor Built Environ* 2006;15:179-86.
 127. Guha A. A unified Eulerian theory of turbulent deposition to smooth and rough surfaces. *J Aerosol Sci* 1997;28:1517-37.
 128. Chen BT, Yeh HC, Cheng YS. Evaluation of an environmental reaction chamber. *Aerosol Sci Technol* 1992;17:9-24.
 129. Nazaroff WW, Cass RG. Mass-transport aspects of pollutant removal at indoor surfaces. *Environ Int* 1989;15: 567-84.

130. Shimada M, Okuyama K, Kousaka Y, Okuyama Y, Seinfeld JH. Enhancement of Brownian and turbulent diffusive deposition of charged particles in the presence of an electric field. *J Colloid Interface Sci* 1989;128:157-68.
131. Fuselli S, Pilozi A, Santarsiero A, Settimo G, Brini S, Lepore A, de Gennaro G, Demarinis Loiotile A, Marzocca A, de Martino A, Mabilia R. *Strategie di monitoraggio dei composti organici volatili (COV) in ambiente indoor*. Roma: Istituto Superiore di Sanità; 2013. (Rapporti ISTISAN 13/4).
132. Lepore A, Ubaldi V, Brini S. *Inquinamento indoor: aspetti generali e casi studio in Italia*. Roma: Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale; 2010. (Rapporti 117/2010)

APPENDICE A
Metodo del gas tracciante
per la misura delle infiltrazioni negli ambienti

Nel metodo del gas tracciante per la misura delle infiltrazioni negli ambienti, si immette nell'ambiente di cui si vogliono conoscere i ricambi orari una determinata quantità di un gas tracciante (il più comune è il protossido d'azoto, N_2O), che generalmente non è presente nell'ambiente stesso. Un analizzatore di gas fornisce l'andamento della concentrazione $x(t)$ in funzione del tempo, che diminuisce a causa delle infiltrazioni e il conseguente ricambio di aria. Se si ha un volume V con una portata di infiltrazione di aria esterna $\dot{m}_{inf}$, in un tempo dt verrà sostituito un volume di aria (Figura A1):

$$dV = \frac{\dot{m}_{inf} dt}{\rho} \quad (A1)$$

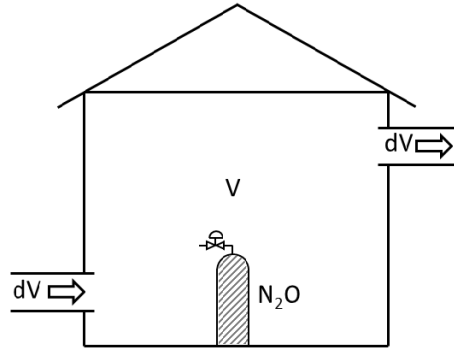


Figura A1. Schema del processo di misura dei ricambi di aria negli ambienti con il metodo del gas tracciante

Si assumono le seguenti ipotesi:

1. l'aria dell'ambiente e il gas tracciante sono gas ideali;
2. le infiltrazioni sono alla stessa temperatura dell'ambiente;
3. la portata d'aria fornita dalle infiltrazioni è costante nel tempo (condizioni stazionarie);
4. la densità dell'aria non viene significativamente influenzata dalla presenza (molto piccola) del gas tracciante;
5. i ricambi di aria dovuti alle infiltrazioni interessano tutto il volume di aria considerato, cioè c'è perfetto rimescolamento dell'aria nell'ambiente.

L'aria che si trova nell'ambiente contiene una concentrazione di tracciante:

$$x(t) = \frac{V_{N_2O}}{V} \quad (A2)$$

(in realtà sarebbe il rapporto tra le moli dei 2 gas, ma a temperatura costante il rapporto delle moli coincide con il rapporto dei volumi). Anche nel volume di aria che fuoriesce la concentrazione è la stessa, cioè:

$$x(t) = \frac{dV_{N_2O}}{dV} \quad (A3)$$

Pertanto la variazione di concentrazione è data da:

$$dx = \frac{dV_{N_2O}}{V} = \frac{dV}{V} x(t) = -\frac{\dot{m}_{inf}}{\rho} \cdot \frac{dt \cdot x(t)}{V} \quad (A4)$$

(il segno meno perché la concentrazione diminuisce), ma $\frac{\dot{m}_{inf}}{\rho \cdot V} = \frac{\dot{V}}{V} = n$ è il numero di ricambi per unità di tempo (se moltiplicato per 3600 diventa il numero di ricambi orari), per cui:

$$\frac{dx}{x} = -n dt \quad (A5)$$

integrando si ottiene.

$$x = x_0 e^{-nt} \quad (A6)$$

dall'andamento della concentrazione nel tempo (Figura A2) con una regressione (o anche con solo due misure a tempi diversi) si ricava il valore di n .

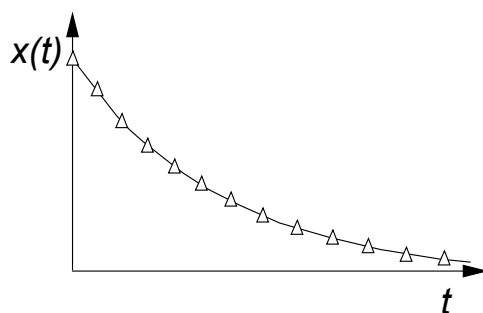


Figura A2. Andamento della concentrazione di un gas tracciante nel tempo

APPENDICE B
Report delle informazioni da registrare
prima e/o durante il monitoraggio dell'aria *indoor*
e dei parametri microclimatici

Sia per le misure dei parametri microclimatici che per la successiva valutazione/interpretazione dei risultati dei dati di concentrazione degli inquinanti, è utile documentare l'ambiente confinato che si intende monitorare attraverso una descrizione dell'organismo edilizio cui appartiene. Secondo la norma UNI 10838 (1) per organismo edilizio si intende "l'insieme strutturato di elementi spaziali e di elementi tecnici, interni ed esterni, pertinenti all'edificio, caratterizzati dalle loro funzioni e dalle loro relazioni reciproche".

La Figura B1 riporta uno schema esemplificativo di organismo edilizio.

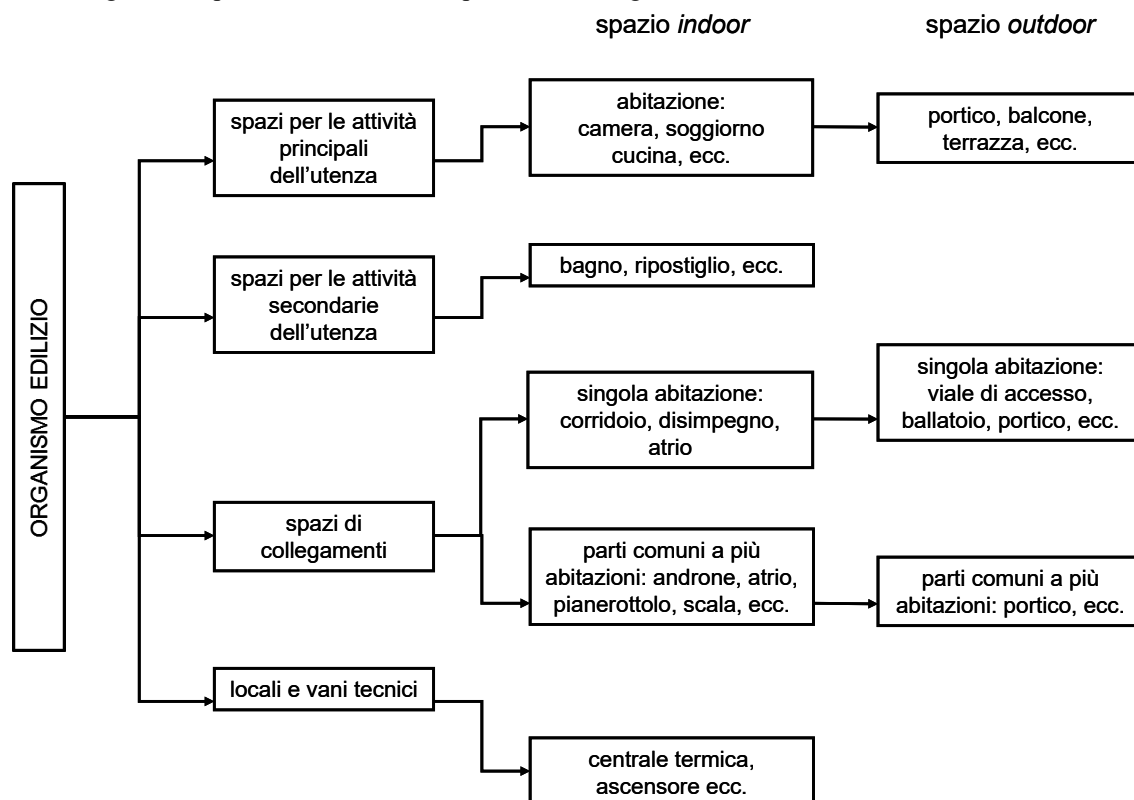


Figura B1. Schema di organismo edilizio

Rimandando alla norma UNI 10838 il significato e terminologia tecnica, qui si riportano solo alcune definizioni concernenti il sistema edilizio e l'edificio.

Il sistema edilizio è l'insieme delle parti che compongono un'opera edilizia, che in base alle norme UNI 8289 (2) e UNI 10838 si scompone in:

- sistema ambientale;
- sistema tecnologico;

e stabilisce il ruolo delle diverse parti ai fini di:

- delimitare, definire e classificare lo spazio;
- garantire condizioni di sicurezza;
- assicurare il benessere abitativo.

L'edificio è un sistema in cui ogni elemento si relaziona all'altro in modo complesso per soddisfare i bisogni dell'utenza.

Di seguito si riporta la classificazione degli edifici in base alla loro destinazione d'uso.

Classificazione degli edifici

Gli edifici possono essere così classificati:

- *Edifici adibiti a residenza e assimilabili*
 - i) abitazioni adibite a residenza con carattere continuativo, quali abitazioni civili e rurali, collegi, conventi, case di pena, caserme, ecc.;
 - ii) abitazioni adibite a residenza con occupazione saltuaria, quali case per vacanze, fine settimana e simili;
 - iii) edifici adibiti ad albergo, pensione e attività similari;
 - iv) edifici adibiti a uffici e assimilabili: pubblici o privati, indipendenti o contigui a costruzioni adibite anche ad attività industriali o artigianali, purché siano da tali costruzioni scorporabili agli effetti dell'isolamento termico;
 - v) edifici adibiti a ospedali, cliniche o case di cura e assimilabili: ivi compresi quelli adibiti a ricovero o cura di minori o anziani nonché le strutture protette per l'assistenza e il recupero dei tossico-dipendenti e di altri soggetti affidati a servizi sociali pubblici;
- *Edifici adibiti ad attività ricreative, associative o di culto e assimilabili*
 - i) cinema e teatri, sale di riunione per congressi;
 - ii) mostre, musei e biblioteche, luoghi di culto;
 - iii) bar, ristoranti, sale da ballo;
- *Edifici adibiti ad attività commerciali e assimilabili*
 - i) negozi, magazzini di vendita all'ingrosso o al minuto, supermercati, esposizioni;
- *Edifici adibiti ad attività sportive*
 - i) piscine, saune e assimilabili;
 - ii) palestre e assimilabili;
 - iii) servizi di supporto alle attività sportive;
- *Edifici adibiti ad attività scolastiche a tutti i livelli e assimilabili*
- *Altri edifici.*

Qualora un edificio sia costituito da parti appartenenti a categorie diverse, le stesse devono essere considerate separatamente e cioè ciascuna nella propria categoria di appartenenza e le reciproche influenze. È da considerare inoltre l'influenza di edifici adiacenti.

Di seguito si riporta un elenco non esaustivo, di informazioni, accertamenti visivi da prendere in considerazione per programmare il monitoraggio, o da registrare durante il monitoraggio dell'ambiente di misura. Tali informazioni integrano quelle già contemplate dal GdS nell'appendice A del documento "Strategie di monitoraggio dei composti organici volatili (COV) in ambiente *indoor*" (Rapporti ISTISAN 13/4) (94). In funzione dello specifico ambiente di monitoraggio, alcune voci dell'elenco possono essere omesse o nuove informazioni possono essere aggiunte:

- ***Informazioni sull'area di ubicazione organismo edificio***
 - Edificio sito in.... (comune)
 - Destinazione d'uso dell'edificio....
- ***Dati topografici della zona***
 - [] altitudine, latitudine e longitudine.....
 - [] luogo di montagna
 - [] luogo di collina
 - [] luogo di pianura
 - [] luogo di mare

– ***Tipo di area***

- ☐ rurale
- ☐ urbano (suburbano)
- ☐ urbano (centro)
- ☐ area industriale
- ☐ altre tipologie

– ***Caratteristiche meteo-climatiche dell'area***

- ☐ clima secco,
- ☐ clima umido,
- ☐ precipitazioni frequenti/abbondanti/scarse
- ☐ velocità e direzione del vento

– ***Esposizione del luogo in relazione alle coordinate geografiche***

- ☐ luogo assolato per una durata...
- ☐ luogo in ombra per una durata
- ☐ vicinanza a fattori inquinanti reti di trasporto,
- ☐ vicinanza ad arterie stradali od autostradali e il loro livello di frequentazione;
- ☐ vicinanza al mare/laghi ecc.....
- ☐ vicinanza a siti industriali.....
- ☐ Altro

– ***Informazioni sulle caratteristiche dell'edificio***

Età dell'edificio

- ☐ < 6 mesi
- ☐ < 2 anni
- ☐ < 10 anni
- ☐ da 10 a 20 anni
- ☐ > 20 anni

Architettura/Forma/Geometria

- ☐ Edifici a schiera
- ☐ Edifici a torre
- ☐ Altro.....
- ☐ Casa isolata:
- ☐ unità abitativa non aggregata che si sviluppano da cielo a terra con giardino privato più o meno consistente
- ☐ altro....
- ☐ Case a schiera con unità abitative aggregate caratterizzate da:
- ☐ sviluppo da terra a cielo;
- ☐ ingressi indipendenti;
- ☐ spazi privati di pertinenza all'aperto;
- ☐ muri in comune
- ☐ Altro....

Planimetria in scala e fotografie del contesto

Nella planimetria, oltre a localizzare l'area in cui si trova l'edificio oggetto di studio, individuare eventuali:

- Strade principali e secondarie
- linee ferroviarie, autostrade ecc.
- palazzi ecc.
- stazioni ferroviarie, edifici pubblici (scuole, chiese, parchi, centro storico, monti, fiumi, laghi ecc.

Planimetria quotata del lotto e/o dell'edificio e fotografie

Nella planimetria oltre ad individuare l'edificio oggetto di studio specificare anche la tipologia degli spazi e degli edifici circostanti ad esempio:

- spazi verdi,
- aree riservate al parcheggio,
- edifici residenziali,
- edifici pubblici, ecc...
- Disegnare dei profili per comprendere il rapporto fra l'edificio oggetto di studio e il suo intorno (edifici e spazi aperti).
- Profili nord – sud – est – ovest

Dati dimensioni dell'edificio

Altezza min edificio m.....

Altezza max edificio m.....

Volume edificio m³.....

Tipologie di appartamenti N°.....

Appartamenti per piano N°.....

Appartamenti totali N°.....

Piani fuori terra N°.....

Piani interrati N°.....

Altezza interpiano m.....

Superficie coperta m².....

Superficie scoperta lotto m².....

Superficie totale lotto m².....

Superfici opache m².....

Superfici finestrate m².....

Superficie totale m².....

- **Informazioni su umidità/ponti termici da acquisire sia per l'ambiente di misura che per l'edificio/organismo edilizio cui appartiene**

Danni da acqua

[] sì [] no

Quando:

Tipo di danno:

Ubicazione:

Risistemato?

[] sì [] no

Quando?

Disagio termico locale

[] no

[] sì

Tipo di disagio.....

[] Corrente di aria

[] Differenza verticale della temperatura dell'aria

[] Asimmetria radiante

Presenza ponti termici

[] no

[] sì

Dove....

Descrizione.....

[] no [] sì Condensa superficiale

[] no [] sì Condensa interstiziale

Temperatura superficiale delle murature °C
 Temperatura aria *indoor*.....
 Velocità aria.....
 Umidità relativa....

Muffe visibili

☐ sì ☐ no

Descrizione.....

Crepe visibili

☐ sì ☐ no

Descrizione.....

Temperatura superficiale delle murature °C

Temperatura aria *indoor*.....

Velocità aria.....

Umidità relativa....

– ***Parametri termoigrometrici degli ambienti adiacenti all'ambiente di misura***

Temperatura operativa aria *indoor*.....

Velocità aria.....

Umidità relativa....

– ***Informazioni sul sistema di ventilazione dell'edificio***

☐ no ☐ sì ventilazione naturale

☐ ventilazione passante (orizzontale o verticale)

☐ ventilazione a lato singolo (singola apertura o apertura multipla)

☐ ventilazione combinata vento + effetto camino

☐ no ☐ sì ☐ ventilazione meccanica

☐ ventilazione combinata

☐ ventilazione ibrida (immissione aria tramite ventilazione naturale ed estrazione assistita da ventilazione meccanica)

– ***Tipi di aperture delle finestre:***

☐ Lucernari apribili

☐ Captatori di vento

☐ Prese di aria orientabili

☐ Camini solari

☐ Estrattori solari di aria

☐ Altro

– ***Dati appartamento/ufficio***

Pianta quotata dell'intero piano contenente l'appartamento con indicazione delle destinazioni d'uso degli spazi confinanti con l'appartamento.

Sezione quotata dell'edificio con evidenziazione dell'APPARTAMENTO, con indicazione delle destinazioni d'uso degli spazi confinanti, dell'organizzazione funzionale interna (zona giorno, zona notte ecc.), identificazione degli spazi (collettivi o comuni, privati, di servizio, di collegamento, di disimpegno) e indicazione di elementi e parti della struttura (pilastri, travi, solai, ecc.).

Dati di dimensioni

Piano N.

Piani abitabili n....

Altezza interpiano netta m....

Superficie appartamento m²....
Volume netto m³....
Unità spaziali N..

Esposizione

A nord:

- Superfici opache m²....
- Superfici finestrate m²....
- Superfici totale m²....

A sud:

- Superfici opache m²....
- Superfici finestrate m²....
- Superfici totale m²....

Ad est:

- Superfici opache m²....
- Superfici finestrate m²....
- Superfici totale m²....

Ad ovest:

- Superfici opache m²....
- Superfici finestrate m²....
- Superfici totale m²....

Bibliografia

1. UNI 10838. *Edilizia - Terminologia riferita all'utenza, alle prestazioni, al processo edilizio e alla qualità edilizia*. Milano: Ente Nazionale Italiano di Unificazione; 1999.
2. UNI 8289. *Edilizia. Esigenze dell'utenza finale. Classificazione*. Milano: Ente Nazionale Italiano di Unificazione; 1981.

*Serie Rapporti ISTISAN
numero di luglio 2015, 7° Suppl.*

*Stampato in proprio
Settore Attività Editoriali – Istituto Superiore di Sanità*

Roma, agosto 2015