

Qualità dell'Aria negli Edifici Scolastici

WP5. Sviluppo e implementazione delle soluzioni

Task 5.2 - Sviluppo di linee guida di progettazione sulla qualità dell'aria all'interno degli edifici scolastici



Data: 13.07.2021

Task Leader: Agenzia per l'Energia Alto Adige - CasaClima

Autore: Zancarli Mirko

Co-autori: Bancher Mariadonata, Atzeri Anna Maria

Indice

QAES - Qualità dell’Aria negli Edifici Scolastici	6
Task 5.2.....	6
1) Ventilazione	7
1.1) Definizione delle portate di ventilazione	8
1.2) Considerazioni preliminari circa la scelta del sistema di ventilazione	14
1.3) Ventilazione naturale.....	16
1.3.1) Ventilazione unilaterale (single sided ventilation)	18
1.3.2) Ventilazione incrociata (cross ventilation)	19
1.3.3) Effetto camino (stack ventilation)	20
1.3.4) Tecnologie di ventilazione naturale.....	23
1.3.4.1) Finestre	23
1.3.4.2) Altre tecnologie: serrande, griglie e lucernari	31
1.3.5) Progettazione della ventilazione naturale.....	32
1.3.5.1) Design concettuale	33
1.3.5.2) Design dettagliato.....	35
1.3.6) Raffrescamento passivo.....	36
1.3.7) Correnti fredde	40
1.3.8) Controllo automatico della ventilazione naturale.....	42
1.4) Ventilazione meccanica.....	44
1.4.1) Sistemi centralizzati di ventilazione meccanica controllata	45
1.4.1.1) Bocchette di presa aria esterna e di espulsione	48
1.4.1.2) Recuperatori di calore	49
1.4.1.3) Filtri.....	52
1.4.1.3.1) Scelta del filtro secondo normativa.....	54
1.4.1.4) Ventilatori	57
1.4.1.5) Canali di distribuzione dell’aria.....	60
1.4.1.6) Terminali di immissione ed estrazione	63
1.4.2) Strategie di distribuzione dell’aria	69
1.4.2.1) Ventilazione a miscelazione (MV, <i>mixing ventilation</i>).....	70

1.4.2.2) Ventilazione a dislocamento (DV, <i>displacement ventilation</i>)	71
1.4.2.3) Ventilazione diffusa dal soffitto (DCV, <i>diffuse ceiling ventilation</i>)	71
1.4.2.4) Distribuzione dell'aria a pavimento (UFAD, <i>under floor air distribution</i>).....	74
1.4.2.5) Ventilazione di strato (SV, <i>stratum ventilation</i>)	75
1.4.2.6) Ventilazione a getto d'urto (IJV, <i>impinge jet ventilation</i>).....	75
1.4.2.7) Ventilazione intermittente a getto (IAJS, <i>intermittent air jet system</i>)	77
1.4.2.8) Ulteriori strategie.....	77
1.4.3) Bilanciamento	80
1.4.4) Controllo della ventilazione	84
1.4.4.1) Gestione dei ventilatori di immissione e di estrazione.....	85
1.4.4.2) Regolazione della portata mediante sensori di CO ₂	87
1.4.5) Rumore	91
1.4.6) Gestione e manutenzione degli impianti di ventilazione	97
1.4.6.1) Polvere	99
1.4.6.2) Agenti microbiologici	103
1.4.7) Sistemi di sanificazione da integrare nella VMC.....	104
1.4.7.1) Lampade UVGI	106
1.4.7.2) Ionizzatori NTP	108
1.4.8) Sistemi decentrali e macchine delocalizzate	108
1.4.9) Ventilazione meccanica e Coronavirus	110
1.5) Ventilazione ibrida	116
1.5.1) Classificazione	117
1.5.2) Strategie di controllo	121
1.5.2.1) Esempio di una strategia di controllo.....	123
1.5.3) Principi di progettazione.....	125
1.5.4) Casi studio.....	128
1.5.4.1) Esempio tipologia A: The Liberty Tower of Meiji University	129
1.5.4.2) Esempio tipologia B: Tångå School	130
1.5.4.3) Esempio tipologia C: Mediå School	131
1.5.5) Esempi di riqualificazione di edifici esistenti	132
1.6) Bibliografia	135

2) Materiali e prodotti basso emissivi, tecniche di inibizione delle emissioni, pulizia e prodotti per l'igiene	143
2.1) Selezione di materiali e prodotti basso emissivi	144
2.1.2) Prodotti liquidi per interni	153
2.1.3) Pavimenti	154
2.1.4) Prodotti a base di legno incollato	156
2.1.5) Sigillanti e adesivi.....	157
2.1.6) Materiali porosi.....	158
2.1.7) Materiali isolanti.....	158
2.1.8) Arredamento e apparecchiature scolastiche.....	159
2.2) Strategie per limitare l'impatto delle emissioni.....	159
2.2.1) Barriere per composti organici volatili	160
2.2.2) Stoccaggio e tecniche di ventilazione	161
2.2.3) Condizioni ambientali interne	162
2.3) Pulizia e prodotti per l'igiene	162
2.3.1) Prodotti per l'igiene a basse emissioni	163
2.3.2) Stoccaggio dei prodotti per l'igiene.....	164
2.4) Bibliografia	165
3) Protezione da condense e muffe	167
3.1) Come prevenire la penetrazione di acqua liquida dal terreno circostante	168
3.1.1) Drenaggio del terreno.....	168
3.1.2) Fondazioni.....	169
3.2) Come prevenire la formazione di muffe, condense superficiali e interstiziali.....	171
3.2.1) Tenuta all'aria e al vento	171
3.2.2) La risoluzione dei ponti termici contro il rischio di muffa e di condensa superficiale	174
3.2.3) Membrane e materiali igroscopici contro il rischio di condense interstiziali.....	176
3.2.4) Analisi igrotermica dei componenti edilizi	180
3.3) Mantenere l'edificio in pressione o in depressione.....	181
3.4) Condizioni igrometriche interne di comfort	183
3.5) Bibliografia	185
4) Protezione da gas radon.....	187

4.1) Aspetti generali	187
4.2) Cosa dice la legge	190
4.3) Nuove costruzioni	190
4.4) Il risanamento del radon in edifici esistenti.....	193
4.5) Cenni alle procedure di misura del radon.....	196
4.6) Gestione e manutenzione dei sistemi di mitigazione del radon.....	197
4.7) Bibliografia	199

QAES - Qualità dell'Aria negli Edifici Scolastici

Il progetto QAES mira ad arricchire e rinforzare la cultura tecnica relativa al tema dell'*indoor air quality* (IAQ), attraverso l'implementazione di soluzioni tecnologiche a basso impatto architettonico e di un approccio metodologico con cui poter valutare il livello di salubrità raggiunto all'interno degli ambienti scolastici. In particolare, verranno effettuate delle campagne di misura in edifici scolastici opportunamente selezionati con l'obiettivo di individuare eventuali problematiche associate alla presenza di inquinanti interni e sviluppare adeguate soluzioni migliorative, purché replicabili. In questo modo, potranno essere elaborate delle linee guida per la progettazione e gestione dell'IAQ nelle scuole, a supporto di progettisti, impiantisti, aziende produttrici ed utenti. Inoltre, grazie alla collaborazione tra i partner QAES e le imprese dell'area transfrontaliera, sarà possibile analizzare e confrontare realtà diverse, per acquisire conoscenze finalizzate allo sviluppo normativo ed economico di settore.

Task 5.2

L'obiettivo dell'Attività (Task) 5.2 consiste nella redazione di linee guida per la progettazione della qualità dell'aria all'interno degli edifici scolastici, declinate opportunamente sia per le nuove costruzioni che per strutture esistenti. L'attenzione si focalizzerà inizialmente sulle due principali macroaree di intervento, rappresentate dalle tecniche di ventilazione e dal controllo delle emissioni inquinanti di materiali e prodotti utilizzati negli ambienti scolastici. Non mancheranno inoltre delle considerazioni relative alla pulizia e alla manutenzione degli impianti di areazione, così come alla gestione dei parametri termigrometrici interni per impedire la formazione di condense e di muffe. Verranno poi esplorati i metodi di prevenzione del problema radon nelle nuove costruzioni e le tecniche di mitigazione negli edifici esistenti.

Le presenti linee guida vogliono essere d'aiuto a progettisti, gestori e a tutti gli addetti ai lavori nella realizzazione di un'elevata qualità ambientale interna negli edifici scolastici, che salvaguardi la salute dei ragazzi e incentivi le capacità d'apprendimento. Infatti, bambini e ragazzi, in virtù della loro maggior vulnerabilità rispetto agli adulti, risentono maggiormente della presenza di contaminanti *indoor* in elevate concentrazioni, le quali possono dar luogo alla cosiddetta "sindrome da edificio malato", con conseguenti disturbi quali nausea, mal di testa, sonnolenza e difficoltà respiratorie. L'implementazione delle linee guida non può prescindere dall'analisi della normativa di settore, già affrontata nell'ambito del Task 3.2, a cui si rimanda per ulteriori approfondimenti. Analogamente, gli strumenti e le tecniche di misura dell'IAQ, che rappresentano uno step fondamentale per ottimizzare gli interventi di risanamento negli edifici esistenti e per verificare la bontà delle soluzioni adottate nelle nuove costruzioni, non verranno esplorate nel documento in oggetto, in quanto già ampiamente trattate all'interno del Task 4.1.

A integrazione delle presenti linee guida è previsto lo sviluppo di un tool di progettazione dell'IAQ, che rappresenta la naturale prosecuzione dell'Attività 5.2. Tale strumento verrà reso disponibile sul sito www.qaes.it e sarà scaricabile gratuitamente. In parallelo, verrà elaborato un tool di autodiagnosi dell'IAQ come output del Task 5.3, al fine di individuare le migliori procedure di gestione e manutenzione di un edificio anche sulla base di un monitoraggio delle condizioni ambientali interne.

1) Ventilazione

Nelle strutture scolastiche italiane ed europee vengono spesso riscontrate numerose criticità di qualità dell'aria interna, attribuibili sia a carenze progettuali, edilizie ed architettoniche, come la scelta di materiali non idonei e una scarsa ventilazione degli ambienti, sia a carenze gestionali, come la cattiva manutenzione degli impianti. Allo stesso modo, la realizzazione di edifici sempre più ermetici, in mancanza di un adeguato e corretto ricambio d'aria, comporta un peggioramento dell'IAQ, in quanto viene ulteriormente limitata l'evacuazione spontanea dei più comuni contaminanti rilevati all'interno dei complessi scolastici, come VOCs, bioeffluenti, particolato e radon. La stessa anidride carbonica prodotta attraverso la respirazione degli occupanti, nonostante non possa essere considerata un vero e proprio inquinante, rappresenta una problematica molto diffusa che influisce pesantemente sulla performance e sull'attenzione degli studenti, oltre che sul tasso di assenteismo [1]. Infatti, secondo lo studio di Wargocki e Wyon [2], raddoppiando la portata di aria fresca in ingresso si ha un miglioramento in termini di velocità di esecuzione di problemi logici e matematici dell'ordine del 14%, mentre, riducendo la temperatura interna di 1°C in presenza di surriscaldamento, l'incremento è circa pari al 2%. Di conseguenza, ad un primo intervento volto ad eliminare o ridurre le fonti interne di emissione, si renderà comunque necessaria un'adeguata ventilazione, sia essa naturale, meccanica o ibrida, la cui progettazione rappresenta un elemento chiave per il design olistico dell'*indoor environmental quality* (IEQ).

In Figura 1.1 vengono riportati tutti gli aspetti da tenere in considerazione nella fase di dimensionamento dei serramenti e degli impianti di ventilazione meccanica, così come i potenziali conflitti che devono essere risolti [3].

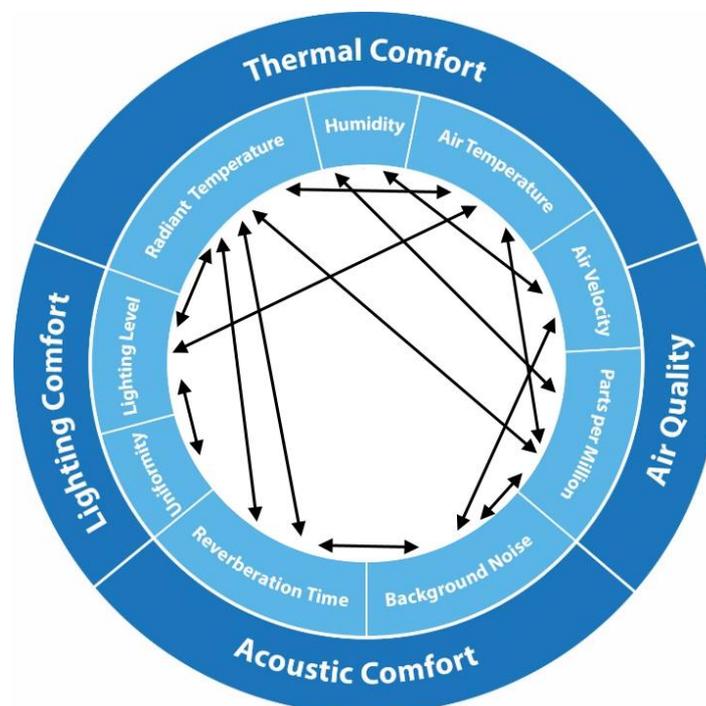


Figura 1.1. Fattori che entrano in gioco nella scelta e nel dimensionamento del sistema di ventilazione [3]

La ventilazione può essere implementata secondo tecniche diverse, di seguito elencate:

- **ventilazione naturale (o areazione):** meccanismo di ventilazione dove l'aria, movimentata da forze naturali associate a gradienti di pressione e di temperatura, entra e abbandona l'edificio attraverso le aperture presenti, come porte e finestre, e attraverso le infiltrazioni. Le aperture possono essere controllate manualmente (areazione) oppure tramite azionamenti automatici;
- **ventilazione meccanica:** sistema di ventilazione dove l'aria è introdotta o estratta dall'edificio, o entrambe le cose, mediante un ventilatore e utilizzando dispositivi di espulsione dell'aria esausta, quali condotti e uscite a tetto/muro. Se la portata di rinnovo viene controllata in funzione di parametri monitorati come CO₂, umidità e occupazione, si parla di ventilazione meccanica controllata (VMC);
- **ventilazione ibrida:** meccanismo di ventilazione in cui la movimentazione naturale e meccanica dell'aria sono combinate in un sistema integrato.

Se i sistemi di ventilazione meccanica possono essere progettati separatamente rispetto al design dell'edificio, la ventilazione naturale deve essere concepita congiuntamente all'immobile e ai suoi componenti, in quanto essi influenzano il moto dell'aria e la concentrazione di inquinanti in ingresso. Nonostante i sistemi meccanici limitino le perdite energetiche per ventilazione e assicurino elevati ricambi d'aria anche con condizioni esterne sfavorevoli, la ventilazione naturale, nelle zone in cui il clima lo consente, viene solitamente preferita rispetto ai primi, sia per ragioni economiche, sia per il timore che gli impianti VMC, se mal progettati, possano dar luogo a discomfort acustico e termo-igrometrico o possono diventare essi stessi fonte di inquinamento indoor [4,5]. I sistemi ibridi, invece, sono in grado di commutare i due precedenti funzionamenti a seconda dei parametri ambientali esterni ed interni, minimizzando i consumi e salvaguardando la qualità dell'aria; ne consegue una maggiore libertà di controllo da parte dell'utente, con ripercussioni positive sulla percezione dell'IEQ.

1.1) Definizione delle portate di ventilazione

Le portate di ventilazione da garantire possono essere desunte dalle norme vigenti, come la UNI 10339 [6] e la UNI EN 16798-1 [7], a cui i Criteri Ambientali Minimi [8] si rifanno per la definizione del numero di ricambi orari negli edifici non residenziali. Diversi studi presenti in letteratura raccomandano un tasso di ventilazione non inferiore a 8 L/s per persona, in corrispondenza del quale l'insorgere di problemi riconducibili alla *Sick Building Syndrome* viene notevolmente ridotta [9]; ulteriori benefici in termini di salute e produttività degli occupanti possono essere raggiunti spingendo le portate fino a 25 L/s per persona [10]. Simili portate d'aria, nonostante garantiscano un'elevata IAQ, non sono tuttavia sostenibili dal punto di vista energetico. È altresì corretto precisare come i valori menzionati in precedenza prescindano dai materiali utilizzati e dal loro carico inquinante: se venissero impiegati solo prodotti basso-emissivi, le portate minime tali da evitare problemi alla salute dei ragazzi scenderebbero a 6-7 L/s per persona.

Ulteriori raccomandazioni, in conformità al *Building Bulletin 101* elaborato dall'ESFA [3], prevedono il rispetto dei seguenti punti:

- per i normali ambienti di insegnamento come le aule, dimensionare tutti i sistemi di areazione affinché forniscano una portata d'aria fresca non inferiore a 8-10 L/s per persona durante i periodi di occupazione. Ad esempio, considerando una classe media di 25 alunni, il ricambio d'aria complessivo sarebbe pari a 720-900 m³/h o, analogamente, a circa 4-5 h⁻¹ nell'ipotesi di una superficie utile per studente di 2.40 m² e di un'altezza interpiano di 3 m;
- mantenere una ventilazione minima di 1 h⁻¹ per le due ore antecedenti l'inizio delle lezioni e di 0.15 L/s·m² durante gli intervalli di non occupazione; inoltre, nell'arco dell'intera giornata scolastica, la portata media non dovrebbe scendere sotto i 4 L/s per persona;
- garantire una corretta estrazione dell'aria esausta dai locali soggetti a forte inquinamento. A tale proposito, in Tabella 1.1 viene proposta una formulazione alternativa rispetto a quella prescritta dalla UNI 10339 [6]:

Tabella 1.1. Portate di estrazione per locali con diverse destinazioni d'uso [3,11]

Locale	Portata di estrazione	Note
Aule di artistica	3.5 L/s·m ²	
Stanze contenenti stampanti e fotocopiatrici	2.5 L/s·m ²	Se le stanze sono molto piccole si raccomandano 20 L/s per macchina
Laboratori di scienze	5 L/s·m ²	
Spogliatoi (senza docce)	2.5 L/s·m ²	
Aule con lavorazione del legno/metallo	2.5 L/s·m ²	
Aule con stoccaggio di prodotti chimici	7.5 L/s·m ²	Oppure 2 ricambi orari per 24 ore al giorno
Bagni	6 L/s per doccia o wc	Oppure 7.5 L/s·m ²
Cucine (per istituti alberghieri)	42 L/s per fornello a gas	Attenersi comunque ai requisiti di sicurezza per l'utilizzo del gas e alle norme antincendio

- posizionare le aperture in modo tale da evitare che correnti d'aria fastidiose raggiungano la zona occupata. Infatti, se con la VMC è possibile prevenire tali fenomeni mediante il recupero termico, nel caso della ventilazione naturale essi dipenderanno dalla differenza tra la temperatura operativa interna e la temperatura del getto d'aria in corrispondenza degli utenti, a sua volta funzione del posizionamento relativo tra i serramenti e gli occupanti stessi. Per ulteriori approfondimenti si rimanda al paragrafo 1.3.7;
- gli ambienti in cui vengono prodotte elevate quantità di vapori e fumi, dovrebbero essere ventilati sufficientemente per evitare fenomeni di condensazione.

Relativamente a quest'ultimo aspetto, è possibile fare riferimento al grafico di Figura 1.2, che, in funzione delle condizioni climatiche interne ed esterne e del tasso di produzione di vapore, fornisce la portata d'aria necessaria ad evitare fenomeni di condensazione (ma non di muffa) su una superficie con una ben determinata trasmittanza termica. Tale approccio, pur essendo del tutto qualitativo, può contribuire ad

corretto dimensionamento del sistema di ventilazione, affinché nelle condizioni di progetto vengano verificati tutti i requisiti di qualità dell'aria. Questa tematica, relativa al controllo dell'umidità e alla protezione da condense e muffe, verrà approfondita ulteriormente nel Capitolo 3.

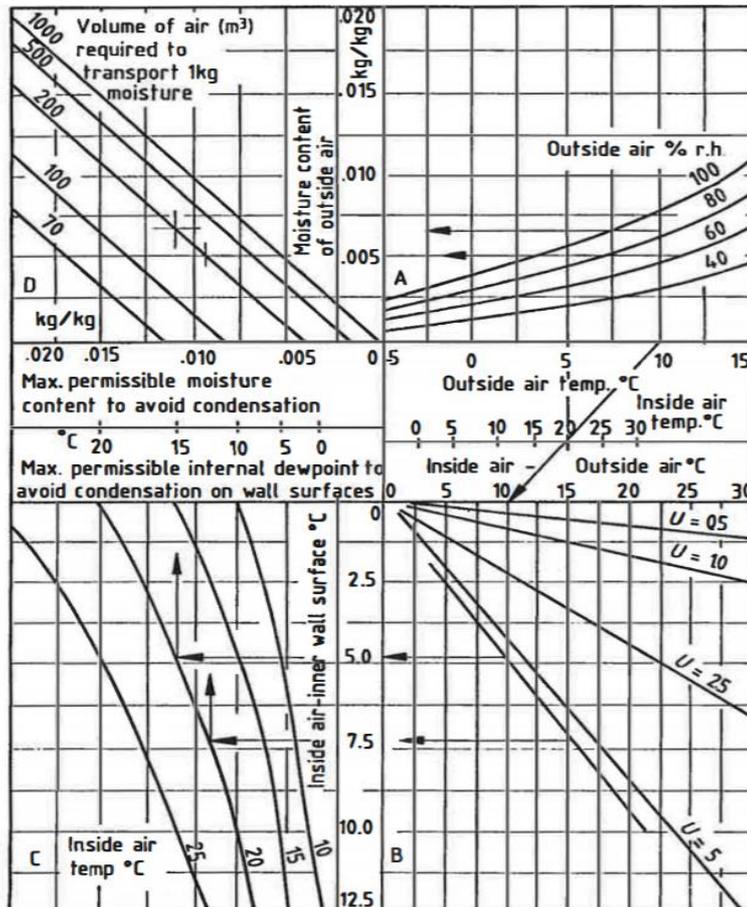


Figura 1.2. Portata d'aria richiesta per ridurre il rischio di condensazione sulla superficie interna di una parete al variare della trasmittanza U e delle condizioni esterne [12]

Oltre all'utilizzo dei valori di default per le portate di ventilazione e di estrazione, è possibile adottare una procedura più rigorosa per il calcolo del tasso di rinnovo tale da impedire che la concentrazione di equilibrio di un certo inquinante (compresa la CO₂) superi un livello massimo prefissato. Tale procedura corrisponde al "Method 2 using criteria for individual substances" della UNI EN 16798-1, secondo cui la portata di aria esterna Q in [m³/s] richiesta per diluire un dato contaminante è esprimibile come:

$$Q = \frac{G_h}{E_v(C_{h,i} - C_{h,o})} \quad [m^3/s]$$

dove G_h è il tasso di emissione dell'inquinante in [µg/s], E_v è l'efficienza di ventilazione, mentre $C_{h,i}$ e $C_{h,o}$ sono, rispettivamente, la concentrazione limite dell'inquinante nell'aria interna e la concentrazione nell'aria di mandata, entrambe espresse in [µg/m³].

La norma UNI EN 16798-1 prevede altri due metodi per il calcolo della portata d'aria: il "Method 1 based on perceived air quality" e il "Method 3 based on pre-defined ventilation air flow rates", ognuno dei quali può essere utilizzato in alternativa l'uno all'altro e a quello mostrato in precedenza. Se invece i tre criteri venissero applicati in contemporanea, basterebbe assumere come portata di progetto il più grande tra i valori calcolati. Ciò nonostante, nelle presenti linee guida verrà presentato solamente il "Method 2", in quanto implementato nel tool di progettazione sviluppato nell'ambito del progetto QAES [38].

Il parametro G_h può essere ricavato dai datasheet dei produttori o dai certificati di prova dei materiali, che dovrebbero almeno riportare il valore di emissione di un dato inquinante a 28 giorni ed espresso in $[\mu\text{g}/\text{s}]$; in alternativa, se si intende fare riferimento a delle categorie generali di prodotto, è possibile consultare opportuni database, previa verifica dell'attendibilità delle relative fonti.

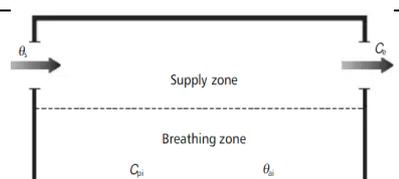
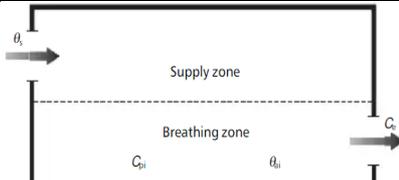
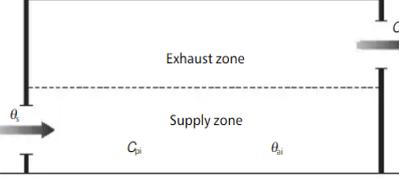
Nel caso in cui la concentrazione limite dell'inquinante nell'aria interna sia espresso in [ppm], per ottenere il corrispondente valore in $[\mu\text{g}/\text{m}^3]$ si suggerisce la seguente equazione:

$$C_{h,i} = (C'_{h,i} \cdot M_p \cdot 1000) / 24.45 \quad [\mu\text{g}/\text{m}^3]$$

dove M_p è la massa molare del contaminante in $[\text{g}/\text{mole}]$, mentre $C_{h,i}$ e $C'_{h,i}$ sono rispettivamente le concentrazioni limite espresse in $[\mu\text{g}/\text{m}^3]$ e in [ppm].

La strategia di ventilazione influisce prepotentemente sulla distribuzione di un inquinante all'interno di un ambiente: se la concentrazione risultante è uniforme in tutto lo spazio, E_v può essere assunto unitario, altrove $E_v < 1$. Nella tabella sottostante vengono indicati i valori di E_v per alcune configurazioni tipiche:

Tabella 1.2. Efficienza di ventilazione per diverse configurazioni [13]

Strategia di ventilazione	Differenza di temperatura [K] tra aria in ingresso e aria interna	E_v
	<p>< 0</p> <p>0 - 2</p> <p>2 - 5</p> <p>> 5</p>	<p>0.9 - 1.0</p> <p>0.9</p> <p>0.8</p> <p>0.4 - 0.7</p>
	<p>< -5</p> <p>(-5) - 0</p> <p>> 0</p>	<p>0.9</p> <p>0.9 - 1.0</p> <p>1.0</p>
	<p>< 0</p> <p>0 - 2</p> <p>> 2</p>	<p>1.2 - 1.4</p> <p>0.7 - 0.9</p> <p>0.2 - 0.7</p>

Per tutte le altre configurazioni, E_v può essere assunto pari a 1.

L'equazione per il calcolo di Q è stata ricavata nell'ipotesi di condizioni stazionarie e supponendo che l'emissione dell'inquinante avvenga ad un tasso costante. Viceversa, con un rilascio limitato nel tempo, la portata di ventilazione può essere ridotta secondo l'espressione seguente:

$$Q'/Q = f\left(Q \cdot \frac{t_p}{1000} \cdot V\right) \quad [-]$$

dove Q' e Q sono, rispettivamente, la portata ridotta e in condizioni stazionarie, entrambe espresse in [L/s], t_p è la durata di emissione dell'inquinante in [s], mentre V è il volume dello spazio occupato in [m³].

L'andamento della funzione $f(Q \cdot t_p/1000 \cdot V)$ è rappresentato dalla linea continua di Figura 1.3, che può essere inoltre utilizzata per determinare il rapporto Q'/Q quando il rilascio è intermittente, ovvero caratterizzato da periodi di emissione di durata t_1 , intervallati l'uno rispetto all'altro da periodi di t_2 secondi. Infatti, mediante le curve tratteggiate, parametrizzate in funzione del parametro $r = t_1/t_2$, e noto il valore in ascissa $Q \cdot t_1/1000 \cdot V$, è possibile risalire al corrispondente rapporto Q'/Q .

Si sottolinea come, per $Q \cdot t_p/1000 \cdot V < 1$, sia comunque necessario fornire una ventilazione minima per compensare eventuali rilasci successivi o fenomeni puntuali di emissione.

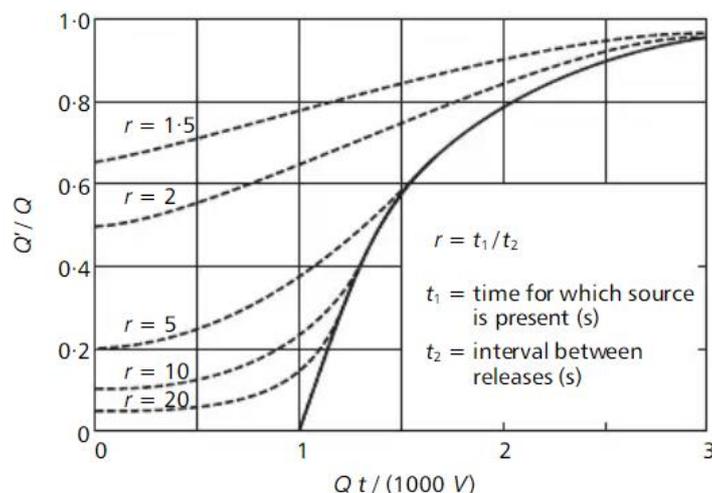


Figura 1.3. Riduzione della portata di rinnovo per emissioni intermittenti di inquinanti [13]

Se in un unico ambiente vengono rilasciate più sostanze pericolose, il calcolo deve essere eseguito per ognuna di esse. La portata di aria fresca da fornire sarà allora pari al valore massimo determinato.

Ciò nonostante, la suddetta procedura può essere semplificata se si assume la concentrazione di CO₂ come indicatore dell'andamento di tutti gli altri inquinanti interni. In particolare, la strategia di ventilazione dovrebbe essere progettata per mantenere il valor medio di concentrazione di CO₂ in un'ora di lezione al di sotto di 1000-1200 ppm in presenza della VMC e al di sotto di 1500 ppm con sistemi naturali o ibridi [3]. Si raccomanda comunque di consultare le normative tecniche di settore, come la UNI 10339 e la UNI EN 16798-1, e di adottare le prescrizioni e i limiti in esse contenuti, a seconda della categoria di IAQ che si intende garantire.

Dal momento che la concentrazione di anidride carbonica, rispetto a quella degli altri inquinanti indoor, dipende fortemente dall'occupazione umana, viene di seguito proposta una relazione che esprime l'andamento nel tempo del suddetto gas:

$$C(t) = C_{t-1} \cdot e^{-Q \cdot t / \rho \cdot V} + \left(\frac{C_{out}}{10^6} + \frac{G}{Q} \right) \left(1 - e^{-Q \cdot t / \rho \cdot V} \right) \quad [kg/kg]$$

dove Q è la portata di ventilazione in [kg/s], G è il tasso di generazione totale di CO₂ in [kg/s], C_{out} è la concentrazione esterna di CO₂ in [kg/kg], t è il tempo in [s], ρ è la densità dell'aria in [kg/m³], V è il volume dell'ambiente occupato in [m³], mentre $C(t)$ e C_{t-1} corrispondono, rispettivamente, alla concentrazione interna di CO₂ al tempo t e $t - 1$, entrambe espresse in [kg/kg].

Tale espressione rappresenta il bilancio di massa di CO₂ nell'ipotesi in cui l'aria all'interno dell'ambiente sia ben miscelata e consente di determinare la concentrazione di anidride carbonica raggiunta al termine di un dato intervallo di tempo, nota la concentrazione al *time step* precedente. Questo procedimento può essere utilizzato, in fase di progettazione, per individuare le portate di ventilazione da destinare a ciascun locale a seconda del *pattern* di occupazione, o in alternativa, per verificare che il ricambio d'aria imposto sia tale da mantenere il livello interno di CO₂ al di sotto del valore limite in corrispondenza di ciascun time step. A tale proposito è possibile servirsi di opportuni strumenti di calcolo, come il "*CO₂ concentration build up calculator*" sviluppato dall'ESFA in collaborazione con BB101 2018 [3], il "*CO₂-Online-Modell*" proposto dal Niedersächsisches Landesgesundheitsamt [126] o il tool di progettazione QAES [38].

Dall'espressione del bilancio di massa di CO₂ è possibile ricavare un'ulteriore relazione, che, nell'ipotesi in cui la concentrazione iniziale coincida con quella esterna, consente di determinare la portata di aria fresca Q_{oc} in [m³/s] richiesta per far sì che la concentrazione limite C_{ss} in [ppm] non venga superata entro un periodo di occupazione ben definito, indicato con t_{oc} ed espresso in [s]:

$$\frac{Q_{oc}}{Q_{ss}} = 1 - \exp\left(-\frac{Q_{oc} t_{oc}}{V}\right) \quad [-]$$

dove Q_{ss} corrisponde alla portata di rinnovo in condizioni stazionarie ed è calcolata come segue:

$$Q_{ss} = \frac{q_{CO_2} \cdot 10^6}{C_{ss} - C_{ext}} \quad [L/s]$$

dove C_{ext} è la concentrazione di anidride carbonica nell'aria esterna in [ppm] e q_{CO_2} è il tasso volumetrico di emissione interna di CO₂ in [m³/s].

È importante far notare come le portate di ventilazione calcolate mediante i metodi sopra analizzati e finalizzate a garantire una buona IAQ potrebbero però non essere sufficienti a preservare gli spazi occupati da fenomeni di surriscaldamento, a causa degli elevati carichi interni e solari. Infatti, in edifici molto performanti dal punto di vista energetico, il fabbisogno di raffrescamento dipende non tanto dalla temperatura esterna, quanto piuttosto dalla radiazione solare incidente e dagli apporti interni associati alla presenza degli utenti, delle luci e dei dispositivi elettronici; ciò conferisce al raffrescamento passivo un enorme potenziale di risparmio energetico, spalmato lungo tutto l'anno scolastico [14]. Dal momento che la progettazione e il dimensionamento dei sistemi di ventilazione deve tenere conto anche di tale potenziale, si preferisce dedicare un capitolo a parte alla tematica, affrontata al paragrafo 1.3.6.

1.2) Considerazioni preliminari circa la scelta del sistema di ventilazione

La scelta del sistema di ventilazione è dettata in primo luogo dalle caratteristiche dell'aria esterna in ingresso, oltre che dalle modalità di controllo della stessa. È ben noto, infatti, come in aree densamente trafficate e popolate l'aria necessiti di un processo di filtrazione, che può essere attuato solo in presenza di un impianto di areazione meccanica o ibrida. Analogamente, in presenza di fonti di rumore esterno significative, il ricambio d'aria effettuato con l'apertura manuale dei serramenti non potrebbe garantire un buon comfort acustico all'interno delle aule.

Solamente mediante uno studio accurato circa il posizionamento dei serramenti è possibile evitare che l'aria in ingresso dagli stessi trascini con sé un'eccessiva quantità di inquinanti e che il rumore esterno si propaghi in modo importante anche negli spazi occupati. Ciò nonostante, è difficile che in tali aree venga mantenuta un'accettabile qualità ambientale interna per tutto il periodo di utilizzo dell'immobile; pertanto, in presenza di rumore e di aria esterna inquinata, si suggerisce di ricorrere alla ventilazione meccanica, indipendentemente dalla zona climatica di appartenenza.

Inoltre, le portate di rinnovo richieste ai fini di una buona IAQ devono essere fornite in qualsiasi condizione di funzionamento: se con i sistemi meccanici è sufficiente garantire l'alimentazione elettrica dei ventilatori, la movimentazione naturale dell'aria è invece funzione dei parametri meteorologici esterni. Ad esempio, in assenza di vento e con una temperatura esterna prossima a quella interna, il passaggio di aria è praticamente nullo.

Riveste poi un ruolo chiave la possibilità di controllo della ventilazione. Con la VMC, è possibile gestire la portata di aria fresca a seconda del tasso di occupazione e/o della concentrazione di inquinanti rilevata all'interno degli ambienti, monitorati attraverso sensori appositamente predisposti e collegati al sistema di controllo dei ventilatori; è inoltre possibile gestire la movimentazione dell'aria tra le varie zone in funzione delle necessità, comandando la direzione dei flussi in ingresso e in uscita dalle stesse. Viceversa, l'areazione manuale non consente un controllo così accurato della ventilazione, essendo subordinata alle condizioni meteorologiche esterne e alla percezione soggettiva degli utenti. Per mitigare l'impatto di tali fenomeni sull'IEQ, possono essere installati dei dispositivi di monitoraggio con visualizzazione dei parametri interni come CO₂, VOC, temperatura e umidità, affinché gli insegnanti o gli alunni possano aprire le finestre in funzione dei valori raggiunti e delle indicazioni provenienti da tali strumenti. In alternativa all'areazione manuale, è possibile predisporre dei sistemi BMS (*building management system*) che, interfacciandosi con opportuni sensori di misura, possono controllare l'apertura/chiusura dei serramenti in modo automatico mediante attuatori e algoritmi dedicati.

Non meno importante, inoltre, il profondo legame che intercorre tra la ventilazione e il consumo di energia primaria dell'edificio: nei climi più freddi, per adempiere ai sempre più stringenti standard energetici, il recupero termico che può essere effettuato tramite gli impianti meccanici, sia centralizzati che non, appare quanto mai fondamentale. In quest'ottica, non si può nemmeno prescindere da un'elevata tenuta all'aria dell'involucro, con l'obiettivo di evitare la formazione di condensa interstiziale, di ridurre le perdite energetiche associate alle infiltrazioni e di minimizzare l'ingresso di contaminanti esterni; ancora, l'areazione meccanica regolando l'umidità interna rappresenta uno strumento chiave per

prevenire la formazione di muffa in corrispondenza dei punti freddi dell'involucro, inibendo le conseguenze negative dei ponti termici non risolti.

È per tutti questi motivi che alcuni protocolli di certificazione, come il CasaClima School [15], consentono l'esercizio della ventilazione naturale o ibrida solo in determinate zone climatiche, sancendo l'obbligo della VMC altrove. In particolare, da un punto di vista puramente qualitativo, si riportano le seguenti osservazioni basate sui gradi giorno (DD) [16]:

- nei climi temperati ($DD < 2000$) la ventilazione naturale rappresenta la soluzione più efficiente, come confermato dagli studi di M. Gil-Baez *et al.* [17] e Krawczyk *et al.* [18]. È importante che il calcolo delle portate e il dimensionamento delle aperture avvenga non solo in funzione dell'IAQ, ma anche del comfort termico e della necessità di raffrescamento passivo;
- nei climi moderati ($2000 < DD < 3000$) la soluzione migliore è rappresentata dai sistemi ibridi, con i quali il recupero termico può essere effettuato in presenza di temperature esterne molto basse. Con temperature più elevate può essere esercitata l'areazione manuale e, ove possibile, il *free cooling* notturno per controbilanciare i carichi estivi sfruttando la capacità termica dell'edificio;
- nei climi severi ($DD > 3000$), data l'esigenza di contenere il fabbisogno di energia per riscaldamento, si raccomanda l'installazione di un impianto VMC che assicuri un buon recupero di calore.

Altri fattori da tenere in considerazione nella scelta del sistema di ventilazione riguardano i fenomeni di discomfort localizzato che si possono generare, come le correnti fredde e l'asimmetria radiante. Non da meno, la stratigrafia dell'involucro, influenzando sulla migrazione del vapor d'acqua attraverso lo stesso, condiziona la scelta del sistema di ventilazione: ad esempio, in presenza di un cappotto interno, si suggerisce l'installazione della VMC per prevenire fenomeni di condensazione interstiziale. Si vuole inoltre rimarcare come, indipendentemente dal sistema di ventilazione adottato, la corretta ermeticità dell'involucro edilizio rivesta un ruolo chiave per una progettazione che salvaguardi il consumo energetico e la qualità ambientale interna, sia di nuove costruzioni che di risanamenti.

È altresì corretto precisare come i sistemi di ventilazione meccanica, soprattutto quelli centralizzati, necessitino di un'accurata gestione e manutenzione: è infatti richiesto un controllo periodico dello stato dei filtri, procedendo con l'eventuale sostituzione degli stessi e una pulizia da effettuarsi lungo tutti i condotti dell'impianto per evitare l'accumulo di polvere e sporcizia al loro interno. Inoltre, per sfruttare appieno tutte le potenzialità della VMC, il gestore/manutentore degli impianti dovrebbe ricevere un'adeguata formazione da parte del costruttore sulle modalità di funzionamento della macchina, avvalendosi del relativo manuale di gestione e manutenzione.

Concludendo, la scelta della strategia di ventilazione è un'operazione assai delicata, che influisce non solo sulla qualità dell'aria interna, ma anche sulle performance energetiche dell'edificio e sulla facilità di gestione dello stesso. Ulteriori aspetti su cui il sistema di ventilazione adottato può manifestare un impatto più o meno importante, riguardano le prestazioni complessive dell'edificio in termini di acustica, illuminazione naturale, sicurezza e antincendio, rispetto ai quali verranno fatti dei brevi accenni. In questi ambiti devono comunque essere soddisfatti tutti i requisiti minimi di legge ad essi relativi, imposti dai

regolamenti di settore come le Norme per l'edilizia scolastica, sancite dalla Legge 11 gennaio 1996, n. 23 [19] e i Criteri Ambientali Minimi, emanati con il D.M. 11 ottobre 2017 [8].

Altri aspetti che possono entrare in gioco nella scelta della strategia di ventilazione, ma che esulano dallo scopo della presente analisi, riguardano i costi d'investimento e di esercizio dei diversi sistemi.

1.3) Ventilazione naturale

La strategia più diffusa per il ricambio d'aria nelle scuole è senza dubbio la ventilazione naturale. Essa consiste nel passaggio di aria attraverso le aperture dell'edificio a causa dell'azione esercitata dal vento, mostrata in Figura 1.4 (a sinistra) e della differenza di temperatura tra l'interno e l'esterno dell'involucro (a destra), da cui deriva il fenomeno di stratificazione termica, indicato in letteratura anche come effetto camino. Queste forze, dipendenti dalle condizioni meteorologiche e dalle caratteristiche morfologiche del sito, determinano non solo l'entità della portata di rinnovo, ma anche il percorso disegnato dall'aria all'interno dell'edificio, a seconda che un'apertura si comporti come un ingresso o come un'uscita.

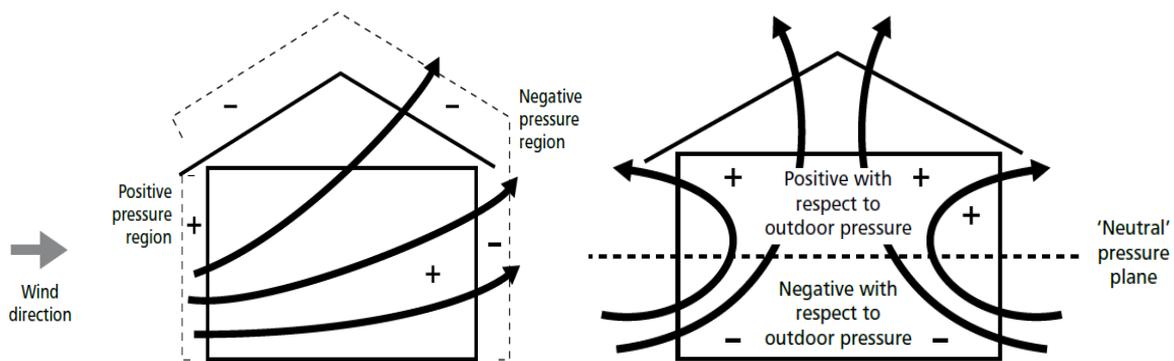


Figura 1.4. Ventilazione dovuta al vento (a sinistra) e ventilazione dovuta alla stratificazione termica dell'aria con temperatura esterna inferiore a quella interna (a destra) [20]

L'azione del vento si manifesta secondo pressioni superficiali diverse che agiscono lungo tutto l'involucro edilizio. In particolare, in corrispondenza della facciata, la velocità del vento diminuisce e la pressione aumenta, mentre sul lato opposto, a causa di fenomeni di separazione del flusso, si crea una zona di ricircolo a bassa pressione. Ancora, lungo il tetto il vento accelera e dà luogo a basse pressioni superficiali. La distribuzione e l'entità della pressione sulla superficie dell'involucro dipende quindi dalla velocità e dalla direzione del vento, dalla forma e dall'altezza dell'edificio, nonché dalla sua orientazione rispetto alla topografia del sito. A tale proposito, per massimizzare il potenziale offerto dall'ambiente circostante, è possibile servirsi di alberi o di altri "ostacoli" con cui incanalare il vento nella direzione voluta, come descritto al paragrafo 1.3.5.1.

La differenza di temperatura tra interno ed esterno dell'involucro si traduce in una differenza di densità dell'aria, che a sua volta, in funzione dell'andamento dei gradienti di pressione con l'altezza, dà luogo ad una differenza di pressione (Δp) che insiste su ognuno dei serramenti dell'edificio. In presenza di due aperture uguali, il punto in cui i due gradienti di pressione si intersecano ($\Delta p=0$), indicato in letteratura come "neutral pressure plan" (NPL), è collocato esattamente a metà tra le stesse; se invece uno dei due serramenti è più grande, per il principio di conservazione di massa il Δp che insiste su di esso sarà minore

rispetto a quello che agisce sull'apertura più piccola, facendo sì che il NPL si trovi più in basso rispetto al caso precedente. In Figura 1.5 viene proposta una rappresentazione grafica di quanto analizzato:

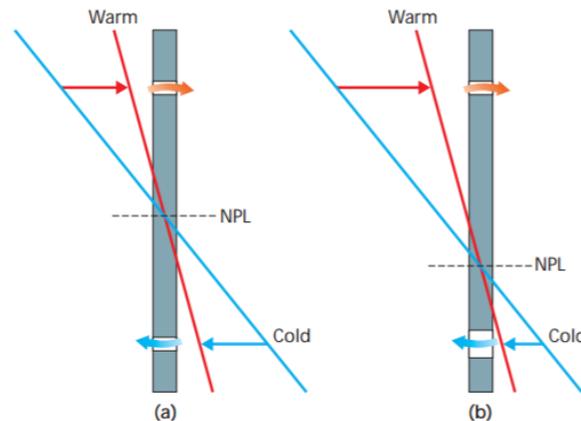


Figura 1.5. Posizione del neutral pressure plan nel caso di superfici di apertura uguali (a) e diverse (b) [21]

Ne deriva che, con una temperatura interna superiore a quella esterna, sotto il NPL l'aria si muoverà dal lato freddo al lato caldo, ovvero penetrerà all'interno dell'edificio; viceversa, sopra il NPL l'aria si sposterà dal lato caldo al lato freddo, ovvero verrà espulsa verso l'esterno. È proprio questo il principio di funzionamento dell'effetto camino, sfruttato per mantenere una parte dell'immobile, generalmente la zona più elevata dell'atrio, ad una temperatura sempre superiore a quella esterna, garantendo così una direzione costante del flusso d'aria e una buona areazione.

Di conseguenza, per godere dei benefici della ventilazione naturale - buona qualità ambientale, bassi costi d'investimento, d'esercizio e di manutenzione - è richiesto uno studio accurato circa il posizionamento e il dimensionamento dei serramenti, da effettuarsi contestualmente alla progettazione dell'immobile. A tale scopo, nei paragrafi successivi verranno esplorati nel dettaglio i meccanismi che contribuiscono alla movimentazione spontanea dell'aria e verranno ricavate delle equazioni per il calcolo delle aree di apertura in funzione delle suddette forze.

Per quanto riguarda la terminologia, nel caso in cui l'apertura e la chiusura dei serramenti avvenga manualmente si parla di areazione, mentre, in presenza di un sistema di controllo con appositi sensori di monitoraggio, tali operazioni possono essere comandate in automatico. La prima modalità può essere conveniente in singole zone prive di connessioni con le restanti, mentre la seconda trova maggiore applicazione in ambienti tra loro collegati.

Il problema principale dell'areazione consiste nel comportamento degli utenti: in inverno, ad esempio, gli insegnanti sono soliti aprire le finestre solamente durante gli intervalli, per evitare di esporre gli studenti all'ingresso di aria fredda. Tale comportamento, però, si ripercuote pesantemente sulla qualità dell'aria interna, poiché impedisce alla concentrazione di CO₂ di scendere sotto valori accettabili durante la stagione fredda. Per massimizzare l'efficacia della ventilazione naturale, si raccomanda pertanto di tararne opportunamente la modalità di esecuzione e di regolarne le tempistiche in funzione dei vincoli climatici esterni. A tale proposito, alcuni studi condotti nei Paesi del Mediterraneo suggeriscono l'adozione dei seguenti criteri:

- aprire tutte le finestre 30 minuti prima dell'inizio delle lezioni e areare per almeno 5-10 minuti durante ogni ora di lezione [1];
- garantire una portata di rinnovo minima durante tutto l'orario scolastico mediante l'apertura di una finestra o di una porta, incrementandone il valore durante gli intervalli attraverso l'esercizio della ventilazione incrociata o di una ventilazione unilaterale sostenuta. Affinché tale modalità sia efficace, è necessario che le pause abbiano una durata sufficiente (15-20 minuti) [22].

Di conseguenza, la scelta accurata della geometria e della posizione dei serramenti, unitamente al rispetto di semplici strategie di areazione, permette in molti casi di diluire efficacemente i contaminanti interni, preservando al contempo il comfort termico degli occupanti.

La ventilazione naturale può inoltre contribuire in modo sostanziale alla riduzione del rischio di surriscaldamento estivo, soprattutto se effettuata durante i periodi di non occupazione e le ore notturne (*free cooling*). Da un punto di vista puramente qualitativo, essa è in grado di controbilanciare un carico termico di raffrescamento, come somma di guadagni termici e solari, mediato lungo l'arco dell'intera giornata, pari a circa 30-40 W/m² [21]. Per ulteriori approfondimenti si rimanda al paragrafo 1.3.6.

Ciò nonostante, indipendentemente dalla modalità di controllo delle aperture, si consiglia di redigere un piano di ventilazione che ne giustifichi la scelta rispetto alla VMC e che garantisca il raggiungimento di un determinato target di qualità dell'aria.

Le strategie di ventilazione naturale più comuni verranno analizzate nei paragrafi successivi.

1.3.1 Ventilazione unilaterale (single sided ventilation)

La ventilazione unilaterale viene praticata in singole zone con una o più aperture collocate su un unico lato dell'involucro e con le porte interne mantenute chiuse. A parità di condizioni esterne, le portate di aria fresca in ingresso sono inferiori rispetto a quelle ottenibili con le altre soluzioni. In riferimento alla Figura 1.6, data una stanza di altezza H , la profondità che può essere ventilata è limitata a $2H$ e $2.5H$ rispettivamente con un'unica apertura e con due aperture. Infatti, se nel primo caso si ha solo l'azione del vento, nel secondo caso è possibile sfruttare anche l'effetto di stratificazione termica dell'aria.

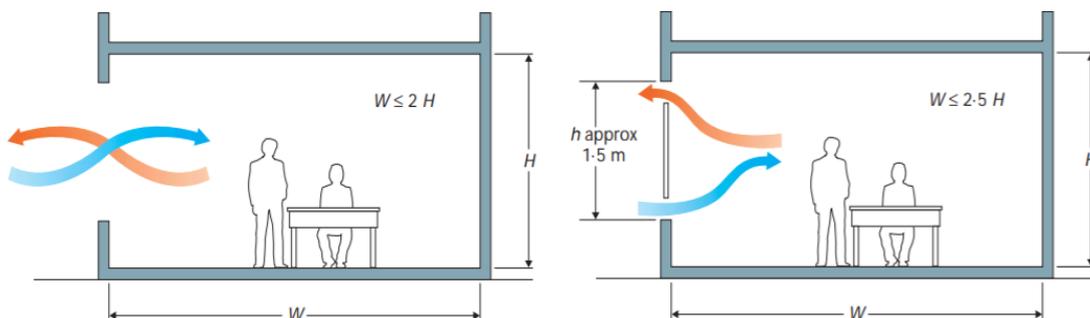


Figura 1.6. Ventilazione unilaterale con un'unica apertura (a sinistra) e con due aperture (a destra) [21]

Nel design della ventilazione unilaterale con due aperture, deve essere posta particolare attenzione al posizionamento di quella inferiore, la quale potrebbe dar luogo a correnti fredde con conseguente discomfort termico percepito dagli occupanti.

1.3.2) Ventilazione incrociata (cross ventilation)

La ventilazione incrociata si verifica quando vi sono delle aperture sui lati opposti di uno stesso ambiente, che permettono all'aria di fluire attraverso lo stesso dando luogo ad una circolazione dei flussi molto efficace. Sebbene la forza del vento giochi un ruolo preponderante, anche la stratificazione termica può contribuire alla movimentazione dell'aria, soprattutto se l'apertura di uscita si trova più in alto rispetto a quella d'ingresso. Come rappresentato in Figura 1.7, anche in questo caso esiste una profondità massima ventilabile corrispondente a $5H$, che incentiva alla realizzazione di edifici stretti e lunghi, oppure sviluppati attorno ad un cortile.

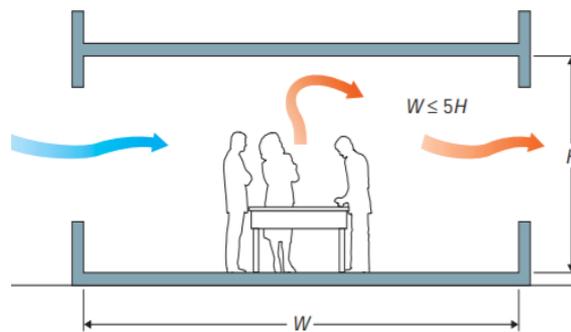


Figura 1.7. Ventilazione incrociata [21]

Affinché questa strategia sia vantaggiosa rispetto alla ventilazione unilaterale, è necessario che i coefficienti di pressione che insistono sulle aperture di ingresso e di uscita siano sufficientemente diversi tra loro; inoltre, bisogna minimizzare la resistenza incontrata dal flusso nel suo passaggio attraverso lo spazio occupato, assicurandosi che eventuali partizioni interne come porte o griglie vengano mantenute aperte. Se ciò non avvenisse, si ricadrebbe in un regime di ventilazione unilaterale.

Nel corso degli anni sono state sviluppate delle soluzioni alternative al semplice impiego dei serramenti per promuovere la ventilazione incrociata anche in situazioni apparentemente sfavorevoli:

- “wind scoop”: analogamente a quanto accade per la vela di un'imbarcazione, l'aria fresca viene prelevata dall'alto dove la pressione dinamica del vento è maggiore, facendo sì che il flusso in ingresso abbia una forza sufficiente a raggiungere il lato sottovento dell'edificio, come rappresentato in Figura 1.8. Per la progettazione di una tale configurazione, deve essere considerato anche l'effetto di stratificazione termica, che in questo caso si oppone al moto voluto dell'aria. Nel caso in cui la direzione del vento cambi frequentemente, si prevedano più ingressi con un meccanismo di controllo automatico in grado di chiudere le aperture sottovento e aprire quelle a favore di vento.

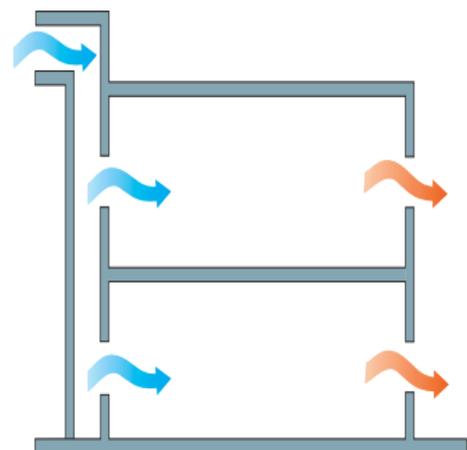


Figura 1.8. Wind scoop [21]

- *“underfloor ventilation”*: per promuovere la distribuzione della portata di rinnovo in spazi molto profondi, possono essere installate delle condotte al di sotto del pavimento per fornire aria fresca ad ambienti privi di aperture sul lato sopravvento. Questo metodo, dunque, consente di ventilare l’edificio da un unico lato, soluzione interessante nel caso in cui la facciata opposta sia rivolta verso una fonte esterna di inquinamento, come una fabbrica o una strada trafficata. Simili configurazioni, come quella di Figura 1.9, essendo caratterizzate da differenze di pressione molto piccole, necessitano di una progettazione molto accurata, volta a minimizzare le perdite di carico lungo le condotte.
- *“roof-mounted ventilator”*: sono dei dispositivi montati sul tetto, simili a dei camini, in cui la differenza di pressione che insiste alle due estremità è tale da guidare l’aria fresca all’interno del condotto di ingresso e di distribuirla nello spazio occupato tramite un modulo diffusore. Dopodiché, la sottopressione creatasi sul lato sottovento del dispositivo consente l’espulsione dell’aria esausta. Queste tecnologie, una cui rappresentazione è proposta in Figura 1.10, sono adatti a lavorare secondo una direzione prevalente del vento e permettono di prelevare l’aria fresca dall’alto, dove l’inquinamento esterno è generalmente inferiore.

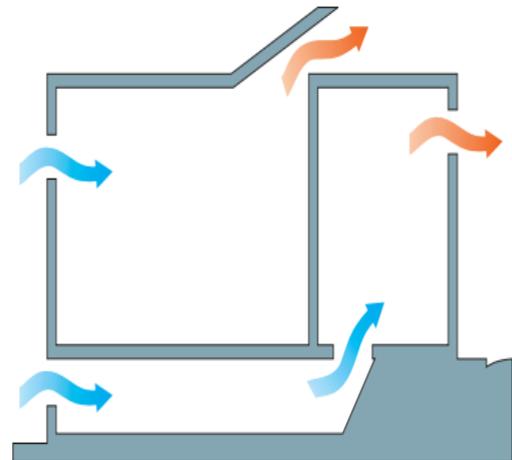


Figura 1.9. Underfloor ventilation [21]

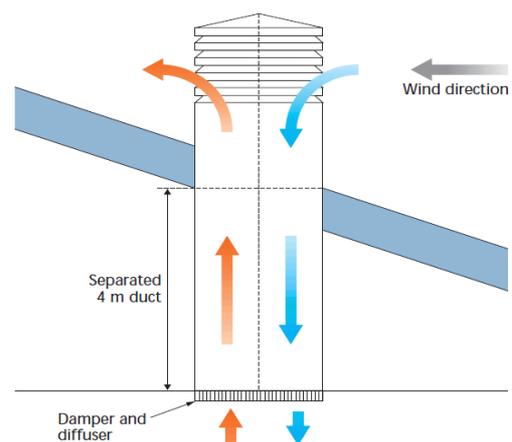


Figura 1.10. Roof-mounted ventilator [21]

Le tre soluzioni analizzate, sebbene siano caratterizzate da un buon potenziale di ricambio dell’aria e di raffrescamento passivo, trovano ancora scarsa applicazione se non in edifici sperimentali. I problemi principali, riscontrati soprattutto in presenza di condotti sotterranei, derivano dalla rumorosità indotta dal flusso di aria e dalla difficoltà di garantire un’igiene e una pulizia accurata dei canali stessi e quindi nella possibile contaminazione dell’aria di mandata.

1.3.3 Effetto camino (stack ventilation)

L’effetto camino si verifica in presenza di differenze di densità dell’aria. In particolare, l’edificio viene ventilato similmente a quanto accade con la ventilazione incrociata, ma in questo caso l’apertura di uscita è rappresentata da un camino centrale o da un atrio. Sebbene richiedano un maggiore sforzo in fase di progettazione e d’investimento, le suddette tecnologie permettono di incrementare la profondità dell’edificio ventilabile mediante forze naturali, come indicato chiaramente in Tabella 1.3:

Tabella 1.3. *Profondità dell'edificio che può essere ventilata a seconda della strategia messa in pratica*

Strategia	Profondità ventilabile in funzione dell'altezza interpiano (H)
Ventilazione unilaterale	2.5H
Ventilazione incrociata	5H
Effetto camino	5H
Effetto camino tramite atrio	10H

Si consiglia di dimensionare le aperture di uscita affinché si trovino ad un'altezza superiore rispetto al soffitto dell'ultimo piano occupato e in una zona a pressione negativa. Il tiraggio del camino può essere incrementato installando al suo interno degli elementi vetrati e delle superfici assorbenti che catturino la radiazione solare, distribuendola lungo tutto il camino e rilasciandola sotto forma di calore all'aria di passaggio. Al contempo, è necessario verificare che le perdite di calore per conduzione siano sempre inferiori rispetto ai guadagni solari, per evitare che, nei mesi invernali, le basse temperature superficiali del vetro possano generare delle correnti fredde discendenti. Viceversa, in climi particolarmente caldi, potrebbe essere richiesto l'impiego di ventilatori di estrazione per sopperire alla bassa differenza di densità tra l'aria fresca ed esausta.

Una soluzione facilmente adattabile agli edifici scolastici consiste nella progettazione di un atrio che, oltre a ricoprire un ruolo chiave per le normali attività di insegnamento e interazione sociale, funga anche da "propulsore" per l'effetto camino. Questa strategia consente di raddoppiare la profondità ventilabile mediante forze naturali, in quanto, se l'atrio si trova in posizione centrale rispetto alle classi, l'aria in ingresso da entrambi i lati dell'edificio si muove progressivamente verso il centro, per poi essere espulsa attraverso le aperture di uscita, come rappresentato in Figura 1.11.

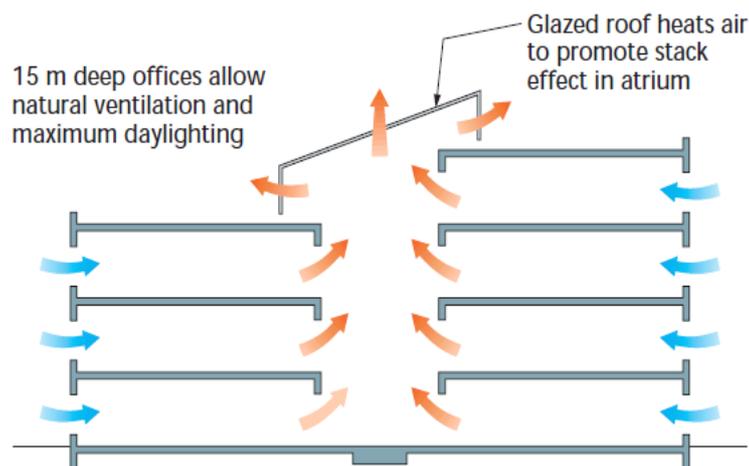


Figura 1.11. *Ventilazione con effetto camino e atrio centrale [21]*

Vi sono poi ulteriori vantaggi collegati all'adozione di tale soluzione, quali una buona illuminazione naturale dello spazio più interno dell'edificio e una riduzione delle perdite termiche per conduzione dagli ambienti circostanti. Per garantire un buon comfort ambientale in tutto l'edificio, è tuttavia richiesto il rispetto dei seguenti criteri:

- 1) protezione degli ultimi piani da temperature eccessivamente elevate, tramite delle superfici di assorbimento che catturino i carichi solari e li trasferiscano direttamente all'aria in uscita. Queste superfici possono consistere negli elementi stessi dell'involucro, oppure in appositi dispositivi di riflessione solare, come deflettori o diaframmi (*solar baffles*);
- 2) progettazione del tetto affinché le aperture di uscita si trovino in una zona a pressione negativa per tutte le direzioni del vento. In alternativa va previsto un sistema di controllo in grado di chiudere i passaggi sul lato sopravvento e aprire quelli sul lato sottovento;
- 3) posizionamento e dimensionamento delle aperture affinché tutti gli ambienti siano ventilati correttamente. In particolare, si raccomanda di estendere l'atrio ben al di sopra della zona occupata, in modo che la differenza di pressione si annulli oltre l'ultimo piano, garantendo così l'estrazione dell'aria esausta.

Quest'ultimo aspetto è di cruciale importanza per quanto riguarda la progettazione della ventilazione naturale per effetto camino. Infatti, come già osservato, al variare della dimensione di un serramento, cambia anche la posizione del NPL. In un edificio di più piani, se l'obiettivo è quello di garantire la stessa portata di ventilazione e quindi la stessa IAQ in tutti gli ambienti, il NPL deve trovarsi al di sopra dell'ultimo livello occupato, affinché questo non venga interessato dal ricircolo e dall'espulsione dell'aria esausta. Di conseguenza, l'apertura di uscita, collocata oltre il NPL, deve elaborare una portata totale pari alla somma di tutti i flussi di aria fresca in ingresso. In una configurazione di questo tipo, la differenza di pressione che insiste al piano terra è maggiore di quella che agisce al secondo piano, che è a sua volta maggiore di quella al terzo piano e così via. Per far sì che ogni livello occupato sia interessato dalla stessa portata, basterà aumentare progressivamente l'area di apertura in funzione dell'altezza a cui si trova il serramento e quindi del Δp che insiste su di esso, come rappresentato in Figura 1.12.

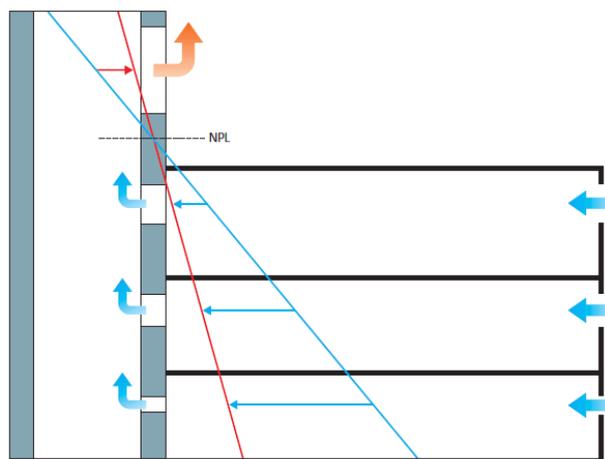


Figura 1.12. Design di un edificio di più piani con effetto camino: variazione delle aree di apertura e NPL [21]

Se la superficie di apertura necessaria all'ultimo piano occupato è troppo elevata, è possibile traslare la posizione del NPL verso l'alto, facendo aumentare la differenza di pressione e riducendo l'area ad essa associata. Ciò comporta un minore Δp in corrispondenza dell'uscita per l'aria esausta e quindi maggiori

dimensioni in fase di progetto: ancora una volta, per mitigare questo effetto, è possibile aumentare l'altezza del camino e con esso la posizione dell'uscita, compatibilmente con i vincoli economici e architettonici esistenti. Inoltre, dal momento che le aperture ai piani inferiori sono più piccole, si hanno dei benefici in termini di sicurezza, soprattutto nel caso in cui venga praticato il raffrescamento notturno.

1.3.4) Tecnologie di ventilazione naturale

L'integrazione delle tecnologie di ventilazione naturale nell'involucro e nel sistema edificio-impianto rappresenta la sfida più importante in fase di progettazione, in quanto, oltre alle portate di rinnovo richieste per una buona IAQ, devono essere garantite ottime prestazioni anche dal punto di vista della tenuta all'aria, della manovrabilità, del comfort termico e acustico, della sicurezza e della compatibilità con i più comuni attuatori elettrici e meccanici. In particolare, una volta definita la strategia di ventilazione naturale, si procede con la scelta delle aperture. Le tecnologie disponibili sul mercato possono essere distinte in tre diversi gruppi:

- **finestre, porte e lucernari;**
- **serrande e griglie;**
- **griglie integrate nei serramenti.**

Nel proseguo si farà riferimento soprattutto alle finestre, che rappresentano i sistemi comunemente più utilizzati negli edifici scolastici. Viceversa, le serrande e le griglie presentano alcuni svantaggi rispetto alle prime, in quanto caratterizzate da una minore tenuta all'aria e spesso anche da una minore capacità di isolamento termico (e acustico), con conseguenti perdite energetiche e problemi di condensazione. Analogamente, se integrate nel telaio dei serramenti, date le limitate superfici di apertura, non assicurano le portate di ventilazione richieste per un'elevata IAQ.

1.3.4.1) Finestre

Le finestre sono sinonimo di un'elevata tenuta all'aria, buon isolamento termico e acustico e di una grande versatilità nell'esercizio della ventilazione, sia manuale che automatica. Le geometrie e le modalità di apertura sono molteplici e la selezione della configurazione migliore, in funzione del caso studio analizzato, deve tenere conto delle caratteristiche della tecnologia stessa e di come queste si ripercuotano sull'ambiente interno e sul comfort percepito degli occupanti. In particolare, nell'ipotesi in cui i parametri termo-igrometrici dei serramenti rispettino i regolamenti edilizi di settore, l'impatto di tali dispositivi sulla ventilazione naturale dipenderà, a titolo indicativo ma non esaustivo, dai seguenti aspetti [23]:

- **dimensione:** è ben noto come all'aumentare della superficie di apertura aumenta anche la portata di rinnovo, secondo le relazioni implementate nel tool di progettazione QAES [38]. Viceversa, la velocità dell'aria in ingresso non subisce variazioni considerevoli al variare delle dimensioni del serramento;
- **forma:** condiziona pesantemente l'efficacia della ventilazione, così come la velocità del getto d'aria in ingresso. Ciò giustifica la grande attenzione da dedicare alla scelta della geometria del serramento, in quanto, a parità di superficie di apertura e di portata erogata, configurazioni diverse danno luogo a differenti percezioni di comfort termico e di IAQ da parte degli occupanti. Per questo motivo, nel prosieguo, dopo aver esaminato le caratteristiche delle finestre

comunemente impiegate nelle scuole, verranno evidenziati i risultati di alcuni studi di letteratura circa il rendimento di determinate combinazioni di aperture;

- **posizione:** a seconda di come un serramento è localizzato rispetto alle estremità della facciata, vi possono essere delle variazioni associate alla circolazione dei flussi di aria all'interno della stanza e alle temperature percepite localmente dagli studenti, mentre complessivamente non si registrano cambiamenti significativi della portata di rinnovo, nonché del livello di IAQ perseguito.

In relazione a quest'ultimo aspetto, la Figura 1.13 mostra la distribuzione dei flussi all'interno di un ambiente con delle aperture a battente inferiore (vasistas) poste in alto e per diverse condizioni esterne.

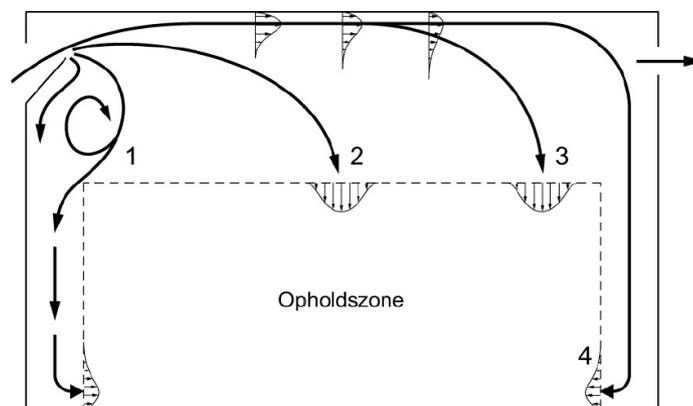


Figura 1.13. Distribuzione dell'aria in una stanza con aperture superiori a vasistas in diverse condizioni [24]

In inverno, quando la temperatura esterna è molto bassa, il getto d'aria assume l'andamento (1), ovvero scivola lungo il muro fino a raggiungere il pavimento, incrementando il rischio di correnti fredde e discomfort termico. Per ovviare a questo problema, è prassi comune installare il radiatore, ove presente, al di sotto della finestra stessa. Nelle mezze stagioni, invece, il flusso in ingresso tende a rimanere in prossimità del soffitto, dando luogo ad un profilo di velocità più uniforme e ad una minore probabilità di correnti fastidiose, come rappresentato dagli andamenti (2) e (3). Infine, in estate, con temperature esterne prossime a quelle interne, l'aria agisce come un getto isoterma (4).

Di conseguenza, la geometria e la posizione dei serramenti condizionano la distribuzione della portata di rinnovo all'intero degli ambienti e concorrono al rischio di correnti fredde, a cui viene infatti imputata la scarsa frequenza di areazione effettuata dagli occupanti durante i mesi invernali. Ciò assume ancora più rilevanza nel caso in cui le aule, come spesso accade, abbiano i serramenti localizzati su un'unica facciata. Fermo restando il rispetto dei requisiti di sicurezza relativi all'impiego degli stessi negli ambienti scolastici, tra cui l'altezza minima dal pavimento, l'angolo massimo di apertura e la classe antisfondamento, ci si pone dunque come obiettivo primario l'ottimizzazione del design e delle modalità di apertura delle finestre al fine di massimizzare la ventilazione e lo smaltimento degli inquinanti indoor.

A tale proposito, diversi studi presenti in letteratura [25, 26, 27] hanno evidenziato come alcune configurazioni permettano di ridurre i fenomeni di discomfort termico associati alle correnti fredde, preservando al contempo l'IAQ. Una di queste è rappresentata dalla ventilazione unilaterale con dei

serramenti sia nella parte alta che bassa della facciata esterna: le aperture superiori, ad esempio, possono fornire una ventilazione costante mediante un sistema di controllo automatico, mentre quelle inferiori, gestite manualmente, permettono all'utente di regolare la portata di aria fresca a seconda delle esigenze e delle condizioni meteorologiche esterne. Mediante questo approccio, può essere inoltre salvaguardato l'esercizio del raffrescamento notturno grazie al controllo automatico dei serramenti superiori.

Un funzionamento come quello appena descritto deve però adattarsi alle caratteristiche delle varie geometrie disponibili sul mercato, nell'ipotesi in cui queste siano applicabili agli edifici scolastici. Nella tabella sottostante vengono raccolte alcune peculiarità delle finestre più diffuse in tale ambito:

Tabella 1.4. Caratteristiche dei serramenti più diffusi negli edifici scolastici [27]

Finestra	Capacità di ventilazione	Controllo	Protezione dal meteo	Ventilazione notturna	Commenti
Bilico orizzontale 	Molto buona	Media	Buona	Buona	Promuovono una buona distribuzione dell'aria fresca e lavorano con attuatori lineari o a catena. Sono possibili solo schermature solari integrate nel vetro.
Battente superiore 	Media	Molto buona	Molto buona	Media	Compatibili con un vasto range di attuatori, vengono di solito installate nella parte inferiore della facciata per la ventilazione giornaliera.
Battente inferiore 	Media	Molto buona	Buona	Molto buona	Adatte all'automazione, vengono utilizzate nella parte alta delle facciate per ventilazione giornaliera e notturna. Problemi con schermature solari interne.
Battente laterale 	Buona	Bassa	Bassa	Bassa	Sono poco adatte all'automazione e al funzionamento invernale a causa delle forti correnti d'aria. Vengono di solito utilizzate in combinazione alle finestre a vasistas.

<p>Bilico verticale</p> 	Buona	Media	Bassa	Buona	<p>La capacità di ventilazione è modesta e sono soggette all'ingresso di pioggia. Agiscono come <i>wind scoop</i> se la direzione del vento è parallela alla facciata.</p>
<p>Ghigliottina verticale</p> 	Buona	Media	Bassa	Buona	<p>Automazione limitata. Nessun problema con schermature solari. Area effettiva ridotta rispetto a quella finestrata. Problemi di scarsa tenuta all'aria, all'acqua e al vento. Possibili correnti d'aria fredde.</p>

Rispetto alle tipologie descritte in Tabella 1.4, non sono state menzionate le finestre a ghigliottina orizzontale, poco adatte all'automazione e ritenute responsabili di numerosi episodi di discomfort termico dovuto alle correnti fredde. Analogamente, i serramenti a ghigliottina verticali trovano oggi poca applicazione, sebbene rappresentino una soluzione interessante per l'esercizio della ventilazione unilaterale. Le finestre a bilico orizzontale, invece, offrono un'elevata capacità di areazione, in quanto, dato un certo angolo di apertura, la superficie effettiva vista dal flusso in ingresso è molto maggiore rispetto a quella che caratterizza, a parità di superficie finestrata, le altre tecnologie. Ad esempio, se si considera un serramento largo 1.2 m e alto 1.6 m, con un angolo di 22° l'area effettiva di apertura è pari a 0.66 m², la quale si ridurrebbe del 40% con una finestra a bilico verticale e del 35% con finestre a vasistas. Ciò nonostante, le ultime vengono spesso preferite rispetto alle prime, a causa del minor rischio di correnti fredde in inverno e di una maggiore sicurezza nell'esercizio del raffrescamento notturno in estate [20].

Simili osservazioni sono riportate nello studio di J. von Grabe *et al.* [27], secondo il quale, in assenza di vento, le finestre a bilico orizzontale (*Hor. pivot window*) mostrano la migliore performance in termini di capacità di ventilazione, seguite da quelle a ghigliottina verticale (*Double vert. slide window*). I rendimenti peggiori appartengono invece alle geometrie a vasistas, sia a battente superiore (*Awning window*) che a battente inferiore (*Tilt window*), mentre i serramenti a bilico verticale (*Vert. pivot window*) e a battente laterale (*Turn window*) presentano delle prestazioni intermedie. A tale proposito, la Figura 1.14 mostra gli andamenti della portata d'aria fresca normalizzata rispetto alla differenza di temperatura tra interno ed esterno, in funzione dell'area di apertura e nell'ipotesi di vento assente:

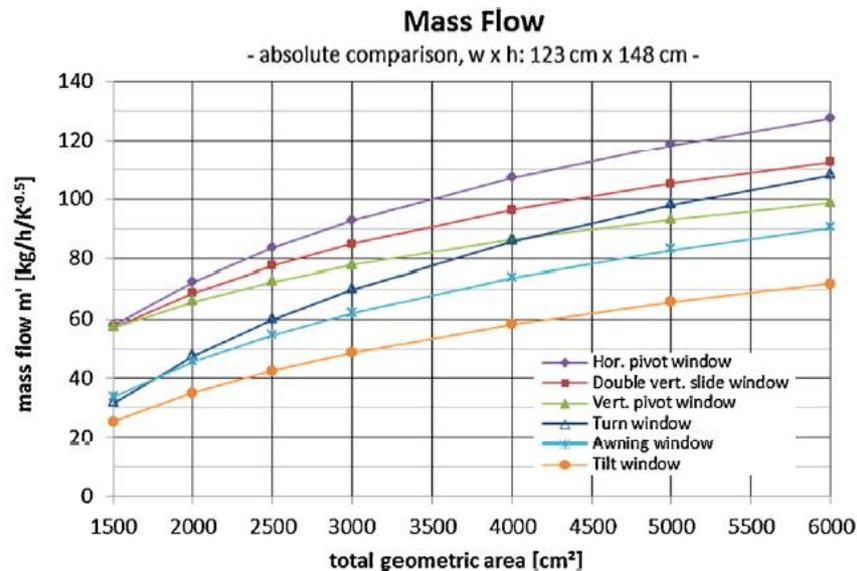


Figura 1.14. Portata d'aria normalizzata sulla differenza di temperatura per diversi serramenti in funzione dell'area di apertura [27]

Tutti questi comportamenti trovano ulteriore conferma nella Figura 1.15, in cui vengono evidenziati i profili di rimozione di anidride carbonica per gli stessi serramenti in termini di portata di CO₂ rimossa, normalizzata sulla differenza di temperatura, e in funzione dell'area di apertura.

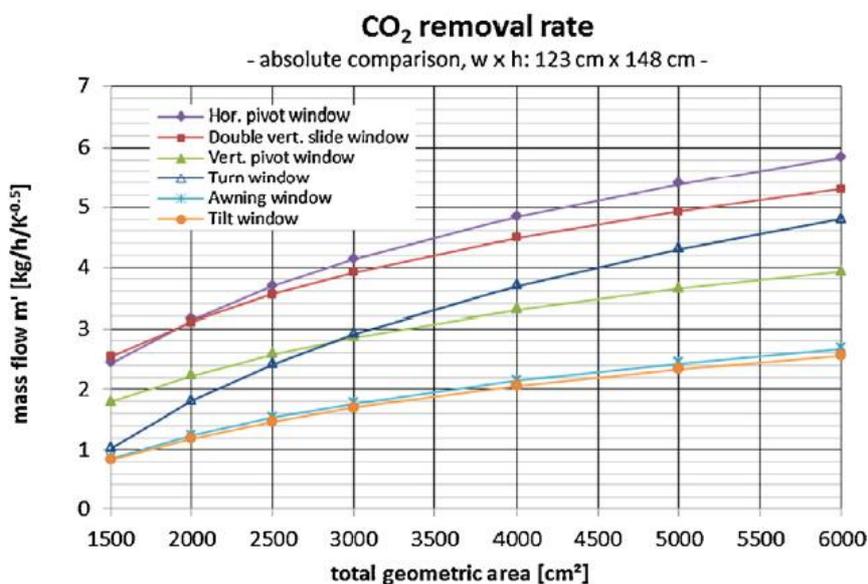


Figura 1.15. Portata di CO₂ rimossa normalizzata sulla differenza di temperatura per diversi serramenti in funzione dell'area di apertura [27]

I risultati conseguiti da J. von Grabe *et al.* sono di grande interesse nella scelta della tecnologia da impiegare, in quanto possono essere facilmente declinati alle condizioni di progetto estive, ovvero

velocità del vento pari a zero e $\Delta T = 3$ K, sulla base delle quali viene effettuato un dimensionamento di massima delle aperture.

Per una valutazione qualitativa dell'influenza del vento sulle prestazioni delle finestre, è possibile fare riferimento all'analisi condotta da J. Wang *et al.* [28], che, con la Figura 1.16, propone l'andamento del numero di ricambi orari in funzione della velocità del vento, a parità di area di apertura, per le medesime geometrie viste nel precedente studio:

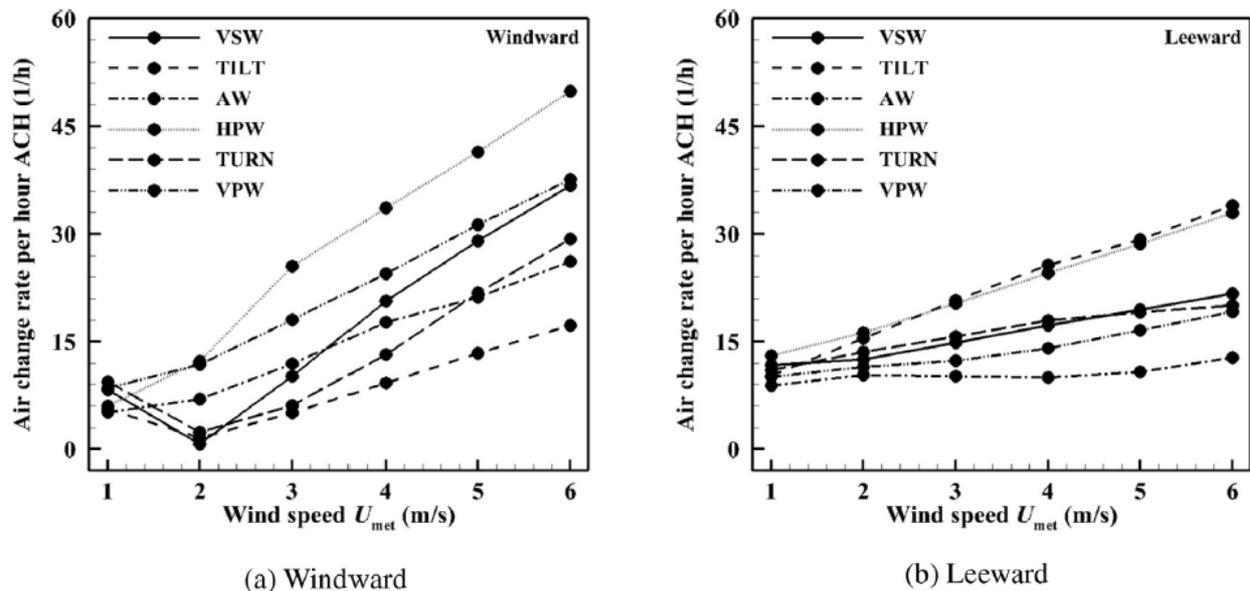


Figura 1.16. Ricambi orari in funzione della velocità del vento per diversi serramenti, sia sul lato a favore di vento (a) che su quello sottovento (b) [28]

In particolare, se i serramenti sono localizzati sulla facciata a favore di vento (a), le prestazioni migliori vengono raggiunte, ancora una volta, dalle finestre a bilico orizzontale (HPW), ma se si considerasse il posizionamento sul lato sottovento dell'edificio (b), le capacità di ventilazione maggiori verrebbero conseguite con le finestre a battente inferiore (TILT).

Un altro importante aspetto da considerare risiede nella direzione del vento. Per comprendere come essa incida sul rendimento di una data geometria, vengono di seguito proposti i risultati principali dello studio di H. Wang *et al.* [29], in cui vengono messe a confronto diverse tecnologie facendo variare solamente l'angolo di incidenza del vento (θ) e l'angolo di apertura dell'anta mobile:

- con finestre a battente superiore, per i tipici angoli di apertura compresi tra 30° e 45° , la capacità di ventilazione è massima quando $\theta = 90^\circ$, ovvero quando il flusso è parallelo all'apertura;
- con finestre a battente laterale, per ogni angolo di apertura, la capacità di ventilazione è massima quando $\theta = 90^\circ$;
- con finestre a battente inferiore, per i tipici angoli di apertura compresi tra 30° e 45° , la capacità di ventilazione è minima per $\theta = 45^\circ$, raggiunge un massimo per $\theta = 0^\circ$ e si mantiene elevata per

$90^\circ < \theta < 180^\circ$. Di conseguenza, questa geometria, al variare della direzione del vento, è caratterizzata da una portata media di ventilazione più alta rispetto alle due precedenti, a causa della bassa resistenza al flusso offerta dall'apertura verso l'interno;

- sul lato a favore di vento ($0^\circ < \theta < 90^\circ$) l'efficienza maggiore viene raggiunta dalle finestre a battente laterale, mentre sul lato sottovento ($90^\circ < \theta < 180^\circ$) da quelle a battente inferiore.

Pertanto, il progettista, prima di selezionare la tipologia di serramento da installare, dovrebbe studiare l'andamento dei parametri ambientali esterni come temperatura, velocità e direzione del vento in corrispondenza del sito di interesse, al fine di individuare le tecnologie più prestanti nelle condizioni medie di esercizio (ovvero in grado di massimizzare la portata di rinnovo e preservare il comfort termico per la maggior parte del tempo) per ognuna delle esposizioni dell'edificio. Tali tecnologie dovranno poi essere combinate l'una con l'altra, per dar vita a delle configurazioni che ottimizzino l'efficienza della ventilazione naturale, sia inverno che in primavera/estate.

A conferma di quanto detto finora, un'indagine condotta su numerose scuole tedesche [30] ha dimostrato come una delle soluzioni più performanti nel caso in cui venga esercitata la ventilazione unilaterale, anche per ragioni di sicurezza e di automazione, sia quella a battente laterale con meccanismo anta/ribalta e quella a bilico orizzontale, entrambe in combinazione con serramenti a vasistas.

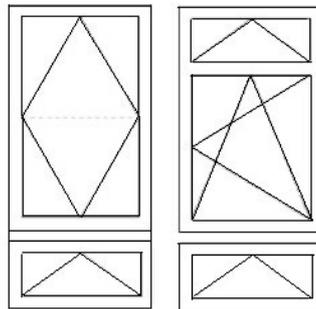


Figura 1.17. Configurazioni adatte alla ventilazione naturale degli edifici scolastici [30]

Infatti, tali tecnologie, rappresentate schematicamente in Figura 1.17, assicurano un buon ricambio d'aria durante l'orario scolastico in tutte le stagioni dell'anno: in inverno, sono da preferire le aperture a vasistas, che riducono i fenomeni di discomfort termico assicurando un buon rimescolamento dell'aria, mentre durante i mesi più caldi, a causa delle basse differenze di temperatura tra interno ed esterno, si dovrà optare per maggiori aree di passaggio, ottenibili con le aperture a battente o a bilico orizzontale. Inoltre, è possibile modificare in fase di esercizio la tipologia e il numero di finestre aperte, così da individuare la configurazione migliore in funzione delle condizioni climatiche esterne; se questo compito è demandato ad un sistema di controllo automatico, si consiglia di lavorare secondo delle varianti predefinite affinché venga preservato il comfort termico interno. Ad esempio, nello studio condotto da [25] alcune di queste varianti sono state confrontate tra loro, per individuare le più adatte alle condizioni di funzionamento invernali:

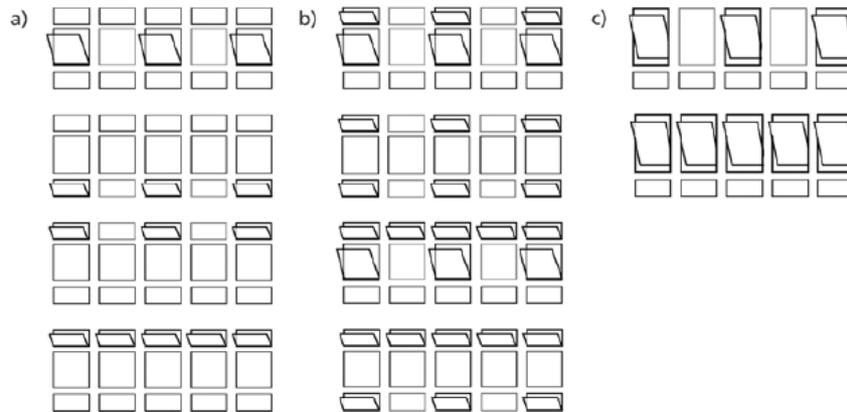


Figura 1.18. Possibili varianti per la ventilazione naturale in inverno [25]

Rispetto al caso a) di Figura 1.18, che fornisce dei ricambi d'aria limitati, l'opzione b) è particolarmente indicata per l'automazione delle aperture e garantisce elevate portate d'aria fresca. Queste dipendono soprattutto dalla velocità e dalla direzione del vento piuttosto che dalla temperatura esterna e ciò si traduce in una ventilazione più stabile e costante. Al fine di preservare il comfort termico degli studenti, si suggeriscono le disposizioni con finestre centrali ad anta/ribalta e superiori a vasistas. Infine, l'opzione c), rispetto alle precedenti due, dispone di serramenti a bilico orizzontale, che da un lato assicurano un buon comfort ambientale, e dall'altro, riducono i costi di automazione. In questo caso, è necessario tarare opportunamente l'angolo di apertura (di solito non oltre i 12°) per evitare fastidiose correnti d'aria.

Un'interessante alternativa alle soluzioni appena analizzate è la configurazione proposta da F. Ruan *et al.* [26], indicata con il termine "Up-down folio window" e rappresentata in Figura 1.19:



Figura 1.19. "Up-down folio window" [26]

Essa è costituita da due aperture a battente laterale sovrapposte, entrambe aperte a 45° ma in direzione opposta l'una all'altra. Se confrontata con le precedenti varianti, è caratterizzata da una maggiore flessibilità alle condizioni climatiche esterne e garantisce buone prestazioni anche per diverse direzioni del vento. Inoltre, il flusso in ingresso è contraddistinto da una bassa velocità grazie ad un mescolamento efficace con l'aria calda interna, riducendo gli episodi di discomfort termico dovuto alle correnti fredde. Resta però da verificare il rispetto dei requisiti di sicurezza e di protezione contro gli agenti atmosferici esterni.

1.3.4.2) Altre tecnologie: serrande, griglie e lucernari

Oltre alle finestre, sono disponibili sul mercato ulteriori tecnologie in grado di favorire il ricambio naturale dell'aria. È il caso delle **serrande** e delle **griglie** montate in punti specifici dell'edificio, una cui rappresentazione è fornita in Figura 1.20, le quali possono contribuire al raffrescamento passivo senza creare problemi di sicurezza; inoltre, grazie alla loro flessibilità di posizionamento, rappresentano una possibile soluzione in aree con forte inquinamento acustico o con traffico sostenuto. Ciò nonostante, non garantiscono sufficiente ventilazione e sono dunque da utilizzare in combinazione con altri sistemi.

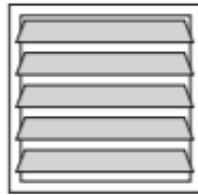


Figura 1.20. Rappresentazione schematica di una griglia di ventilazione

Analogamente, le griglie integrate nel telaio delle finestre trovano poca applicazione in ambito scolastico, in quanto non sono in grado di soddisfare le elevate portate di rinnovo ivi richieste e pertanto necessitano dell'interazione con altri dispositivi. Possono comunque essere utilizzate per fornire una ventilazione minima (*background ventilation*) durante il periodo invernale, ad esempio con temperature esterne molto basse, preservando gli studenti da fastidiose correnti d'aria. A tal fine si suggerisce di installare le griglie ad un'altezza minima dal pavimento pari a 1.75 m, affinché l'aria fresca in ingresso possa miscelarsi con quella interna prima di raggiungere la parte inferiore del locale. Il design delle lamelle deve essere tale da garantire la protezione dagli agenti atmosferici, impedendo l'ingresso di pioggia: si raccomanda pertanto l'utilizzo di tecnologie in classe A secondo UNI EN 13030 [31], come i profili rappresentati in Figura 1.21:

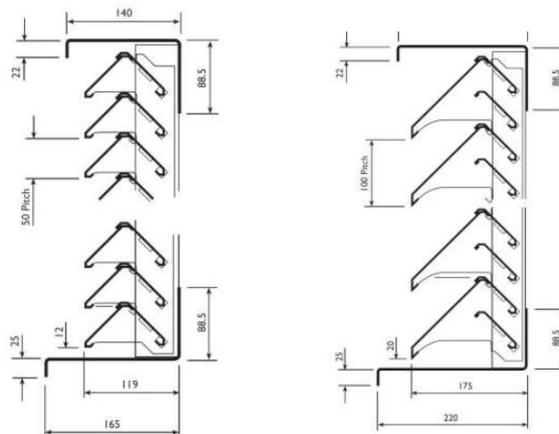


Figura 1.21. Design delle lamelle per impedire l'ingresso di pioggia [32]

Inoltre, le soluzioni più efficienti prevedono il controllo dell'apertura/chiusura in funzione degli inquinanti indoor, come la CO₂, dell'umidità relativa o della differenza di pressione tra interno ed esterno. Si sottolinea ancora una volta come il difetto maggiore di queste tecnologie consista in una tenuta all'aria di

gran lunga inferiore rispetto a quella delle finestre e nella possibilità di condensazione a causa delle basse prestazioni di isolamento termico: come tali **non sono adatte ad edifici a basso consumo energetico**.

I **lucernari** sono invece utilizzati come aperture di espulsione dell'aria esausta, soprattutto in costruzioni a sviluppo verticale in cui può essere sfruttato l'effetto camino. Nonostante le forme e i profili possano essere molteplici, il dimensionamento delle superfici di uscita segue una procedura del tutto simile a quella delle finestre e si basa sui medesimi principi. Per quanto riguarda la posizione, si consiglia l'installazione oltre o in corrispondenza del punto più alto del tetto, in modo da minimizzare l'influenza della turbolenza del vento dovuta all'inclinazione della falda. Sono inoltre da evitare le zone a pressione positiva in quanto, altrimenti, potrebbero verificarsi delle correnti fredde discendenti durante il periodo invernale.

Come già osservato, alcune strategie di ventilazione naturale si servono di condotti per veicolare l'aria fresca all'interno di tutti gli ambienti occupati, come accade ad esempio con i **roof-mounted ventilators**. I criteri di dimensionamento sono però diversi rispetto a quelli che vengono seguiti con i convenzionali sistemi meccanici, in quanto le perdite di carico ammesse sono estremamente più piccole. Ciò comporta, a parità di portata d'aria di passaggio, spazi maggiori in cui dovranno essere alloggiati condotti molto più grandi.

Indipendentemente dalla tecnologia utilizzata, è importante concedere sempre agli occupanti la possibilità di controllare efficacemente la ventilazione, anche attraverso il bypass del sistema di automazione eventualmente presente. Ciò, infatti, si ripercuote positivamente sia sull'IAQ che sulla percezione soggettiva degli utenti, che ad esempio possono aumentare la portata di aria in ingresso in concomitanza con particolari attività o in presenza di cattivi odori. A tale proposito si suggerisce di predisporre in ciascuna aula un display con cui gli studenti e gli insegnanti possono verificare le condizioni di qualità ambientale interna, come CO₂, umidità e temperatura, e provvedere se necessario all'apertura manuale delle finestre. In alternativa o in combinazione con l'areazione manuale, si consideri l'installazione di un sistema di automazione della ventilazione naturale con sensori di CO₂ e di temperatura per evitare eccessive perdite di calore in inverno e per garantire il *free cooling* notturno in estate.

1.3.5) Progettazione della ventilazione naturale

La progettazione della ventilazione naturale consta di differenti fasi, che possono essere così elencate:

- 1) **design concettuale**: in funzione delle caratteristiche climatiche e morfologiche del sito, viene individuata la strategia di ventilazione naturale da mettere in pratica e allo stesso tempo vengono ricavate alcune indicazioni di massima circa la posizione, la forma e le dimensioni dell'edificio;
- 2) **design dettagliato**: vengono dimensionati i serramenti nelle condizioni di progetto, mediante dei tool di simulazione dinamica oppure attraverso dei procedimenti semplificati;
- 3) **valutazione prestazionale finale**: vengono effettuate delle analisi più dettagliate circa la qualità dell'aria interna e il comfort termico, anche mediante dei sistemi di misura, per controllare che la progettazione soddisfi i target posti come obiettivo

Ognuna di queste fasi verrà analizzata nel prosieguo.

1.3.5.1) Design concettuale

Una corretta progettazione della ventilazione naturale deve partire dall'**analisi del clima esterno**, affinché le forze che lo caratterizzano possano essere sfruttate - e non subite - per creare delle condizioni ambientali interne più favorevoli. Innanzitutto, si consiglia di studiare attentamente l'**andamento della temperatura e dei flussi d'aria** che circondano l'edificio **nelle varie stagioni**, così come l'effetto di eventuali ostacoli in prossimità di esso. In tal modo, è possibile identificare la posizione migliore e l'orientazione dell'immobile in funzione del layout del paesaggio circostante. Di seguito alcuni esempi:

- nelle zone collinari o montuose, le scuole dovrebbero essere localizzate lungo i versanti della vallata, evitando le dorsali esposte o i fondovalle chiusi. Così facendo, i venti, ascensionali di giorno e discensionali di notte, vengono guidati attraverso la sezione più piccola dell'edificio promuovendo la ventilazione incrociata. Nelle valli molto strette, come in Figura 1.22, questo fenomeno può dar luogo a venti sostenuti che, mediante un'accurata disposizione delle aperture e un controllo efficace delle stesse, può tradursi in una sufficiente ventilazione naturale e in un buon free cooling notturno;

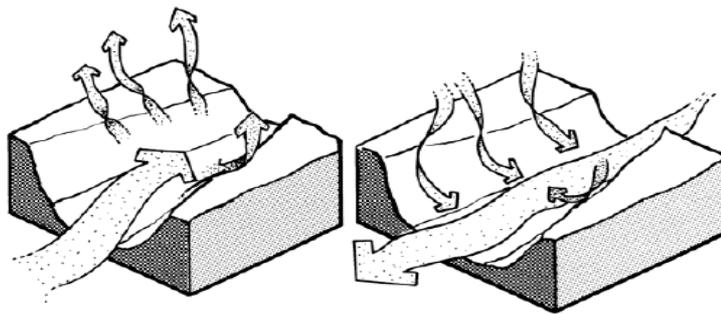


Figura 1.22. Venti ascensionali e discensionali nelle valli [24]

- in prossimità del mare o di grandi laghi, per sfruttare le brezze si consiglia di posizionare gli edifici vicino alla costa con l'asse longitudinale parallelo ad essa, compatibilmente con eventuali vincoli paesaggistici esistenti;
- nelle zone pianeggianti urbane, l'edificio dovrebbe trovarsi ad una distanza dagli altri immobili maggiore rispetto alla profondità della propria scia nella direzione principale del vento (orientativamente, ad un muro alto 3 metri corrisponde una scia di circa 14 metri). Se non è possibile posizionare l'edificio all'infuori della scia degli altri immobili, si raccomanda di disporre l'asse longitudinale in modo opportuno a seconda del clima e della direzione prevalente del vento;
- orientare l'edificio in modo da limitare, per quanto possibile, i carichi solari durante la stagione estiva; in alternativa si prevedano aggetti o sistemi di schermatura.

Indipendentemente dal sito in esame, è necessario identificare tutte le **fonti esterne di inquinamento**, sia ambientale che acustico, per il corretto posizionamento delle aperture di ingresso e di uscita. A tale proposito, se la rumorosità ambientale diurna supera i 55 dB(A), si consiglia di installare un impianto di ventilazione meccanica centralizzata indipendentemente dalla zona climatica [15].

Anche l'ambiente verde che circonda l'edificio ricopre un ruolo chiave nel mantenimento di un'accettabile IEQ: la **vegetazione**, infatti, è in grado di abbassare la temperatura estiva grazie all'ombreggiamento e all'evotraspirazione, ma soprattutto permette di modificare la pressione dell'aria in prossimità delle facciate favorendo la canalizzazione del vento nelle aperture. In Figura 1.23, ad esempio, viene mostrato come un differente posizionamento delle siepi possa favorire o viceversa limitare la ventilazione attraverso le aperture.

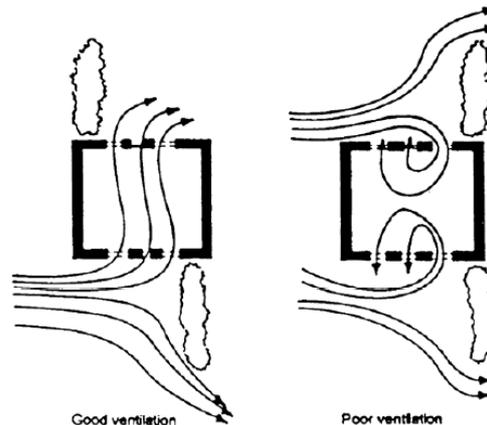


Figura 1.23. Canalizzazione del vento dovuta alla presenza delle siepi [24]

Si osserva come la tipologia di piante da inserire e le superfici da destinare al verde debbano rispettare i Criteri Ambientali Minimi stabiliti dal D.M. 11 ottobre 2017.

In generale, l'utilizzo della ventilazione naturale viene favorito dalle seguenti scelte progettuali:

- edificio a pianta stretta;
- due facciate esterne per ogni aula, di cui una a favore di vento;
- soffitti alti;
- costruzioni pesanti, al fine di sfruttarne l'inerzia termica.

Queste caratteristiche vogliono incentivare all'esercizio della ventilazione incrociata, riconosciuta in letteratura come la strategia più efficiente per gli edifici non residenziali [33]. Ciò nonostante, il rispetto delle norme antincendio e di sicurezza, oltre alla tipica suddivisione degli spazi per motivi di privacy, ne limitano fortemente l'impiego. Perciò, la ventilazione unilaterale e l'effetto camino con atrio centrale rimangono due opzioni molto attrattive, sebbene possano dar luogo a prestazioni inferiori rispetto all'areazione incrociata. Da qui l'importanza di una progettazione che, sin dal concepimento, integri al suo interno il sistema di ventilazione naturale e che lo renda compatibile con tutti i requisiti di sicurezza vigenti.

Oltre a queste problematiche, è necessario sottolineare come il layout dell'edificio debba comunque sottostare a tutta una serie di vincoli architettonici e urbanistici imposti dalla legislazione vigente e che, in determinati casi, potrebbero andare contro la logica della ventilazione naturale, limitandone l'esercizio e la praticabilità. Analogamente, i provvedimenti adottati in questa prima fase di design devono

contemplare e soddisfare anche i target fissati dal committente in termini di qualità ambientale interna e consumo energetico, andando a condizionare ulteriormente la scelta del sistema di ventilazione. Spetterà dunque al progettista tenere conto di tutti questi aspetti.

Si evidenzia come l'analisi delle variabili meteorologiche che governano la movimentazione dell'aria, ovvero il vento e la temperatura esterna, sia propedeutica per una corretta interpretazione della fase di design dettagliato, in quanto, oltre a condizionare il layout dell'edificio, entrano prepotentemente in gioco anche nel dimensionamento dei serramenti e delle varie tecnologie di ventilazione naturale. Pertanto, nel manuale di utilizzo del tool di progettazione QAES [38], a cui si rimanda per ulteriori approfondimenti, viene proposta una procedura di calcolo della velocità di riferimento del vento e vengono fornite alcune indicazioni sui valori di temperatura da utilizzare.

1.3.5.2) Design dettagliato

Dopo aver selezionato la strategia di ventilazione naturale e una volta definita la portata di rinnovo, si prosegue con il dimensionamento dei serramenti, verificando al contempo il rispetto di tutti i requisiti di comfort termico. Il procedimento da seguire prevede l'utilizzo di uno dei seguenti metodi:

- a) grafici basati su analisi parametriche;
- b) calcolo manuale mediante equazioni semplificate;
- c) software di simulazione.

I primi, nonostante siano di immediata applicazione e non richiedano calcoli, vengono sfruttati di rado a causa della limitata versatilità; i secondi, caratterizzati da un periodo di analisi di 24 ore, possono essere implementati con facilità, ma non tengono conto dell'inerzia termica dell'edificio e della variazione della portata di ventilazione tra giorno e notte; i terzi, viceversa, ne simulano il comportamento in periodi di tempo più lunghi, avendo come input i dati meteo reali, e permettono di valutare la frequenza e l'entità del fenomeno di surriscaldamento. Indipendentemente dal software utilizzato, sono richiesti come dati in ingresso le caratteristiche dell'edificio in termini di rapporti minimi aero-illuminanti e le relative orientazioni, la programmazione dei carichi termici interni, i dati meteo (tramite *Test Reference Year* o *Design Summer Year*) e la modalità di ventilazione, compresi gli intervalli in cui questa verrà esercitata. Il calcolo restituisce come output la temperatura interna di picco, che può essere via via ridotta aggiustando i valori dei parametri di input dando vita ad un processo iterativo, fino a soddisfare tutti i target prefissati di comfort termico. Si osserva inoltre la necessità di inserire nella simulazione l'andamento delle concentrazioni di inquinanti interni e della CO₂ in funzione delle attività e del tasso di generazione interno, così che portata di ventilazione calcolata per via iterativa sia tale da soddisfare la classe di IEQ desiderata. Dopodiché, sulla base di tale portata, dovranno essere dimensionate le aperture.

In generale, per il calcolo delle superfici di apertura, si suggerisce di procedere in via cautelativa, assumendo, come condizioni di progetto, velocità del vento nulla e una differenza di temperatura tra interno ed esterno pari a 3 K. In questo modo, la portata di rinnovo determinata in precedenza può essere garantita in quasi tutti gli scenari di funzionamento, evitando al contempo di sovradimensionare in modo eccessivo le aperture. In alternativa, è possibile assumere delle condizioni di progetto estive ed invernali, per determinare, rispettivamente, la superficie massima e minima delle aperture, mentre in tutti gli altri

punti di esercizio si avranno delle aree e delle portate intermedie. Un eventuale sistema di azionamento automatico con modulazione continua del flusso d'aria, dovrà dunque lavorare tra le due posizioni limite e modificare progressivamente l'angolo di apertura delle finestre in funzione delle condizioni di off-design rilevate.

Gli strumenti disponibili per questa fase di progettazione sono molteplici e possono essere così elencati:

- modelli di flusso attraverso l'involucro;
- fluidodinamica computazionale (CFD);
- modelli termici e di ventilazione combinati;
- modelli in scala fisica.

I primi sono i più semplici da utilizzare, in quanto, mediante l'implementazione di poche equazioni, consentono di dimensionare i serramenti nelle condizioni di progetto. Viceversa, i secondi sono particolarmente adatti a simulare il comportamento dell'edificio e della ventilazione in tutte le condizioni di funzionamento e a rappresentare i meccanismi di stratificazione e di movimentazione locale dell'aria che si verificano soprattutto in spazi molto grandi come atri e corridoi. I terzi e i quarti sono invece raramente impiegati.

In particolare, proprio mediante l'implementazione di un modello di flusso a singola cella attraverso l'involucro, il tool sviluppato nell'ambito del progetto QAES permette di determinare l'area di apertura in funzione della strategia di ventilazione selezionata, della tecnologia impiegata e della portata d'aria richiesta [38]. Quest'ultima, a sua volta, può essere calcolata in modo più rigoroso tenendo conto sia delle esigenze degli occupanti in termini di IAQ che della necessità di raffrescamento passivo per compensare i carichi interni e solari. Dopodiché, l'analisi può concludersi con una valutazione dell'entità delle correnti d'aria, affinché tutti i criteri di comfort termico vengano verificati. In caso di esito negativo, si consiglia di modificare i dati di input, come le caratteristiche geometriche del serramento, dando vita ad un processo iterativo fino a soddisfare i target di IEQ richiesti dal committente. Diversamente, si dovrà ricorrere alla ventilazione ibrida o meccanica.

Si rimanda al manuale di utilizzo del tool di progettazione QAES [38] per una descrizione dettagliata delle equazioni implementate per il calcolo dell'area di apertura dei serramenti; nel prosieguo verranno invece affrontati i temi del raffrescamento passivo e delle correnti d'aria.

1.3.6) Raffrescamento passivo

L'apertura manuale o automatica delle finestre possiede un potenziale di raffrescamento passivo, che corrisponde alla capacità dell'aria esterna di ridurre o eliminare i carichi estivi senza consumo di energia elettrica, mantenendo al contempo un buon comfort termico. Questo potenziale, valutato in funzione delle proprietà termiche dell'involucro, dell'occupazione, dei carichi interni e della modalità stessa di areazione, viene messo in pratica attraverso la ventilazione notturna e/o un incremento della portata di rinnovo diurna. Ciò nonostante, l'esercizio del raffrescamento passivo è fortemente legato al clima esterno, come rappresentato in Tabella 1.5:

Tabella 1.5. Strategie di raffrescamento passivo in funzione delle condizioni climatiche esterne [14]

Condizioni climatiche esterne	Strategia di raffrescamento passivo	Opzioni aggiuntive
Clima freddo ($\Delta T > 10^{\circ}\text{C}$)	Minimizzare la portata d'aria in ingresso per evitare fastidiose correnti d'aria	-
Clima temperato ($2 < \Delta T < 10^{\circ}\text{C}$)	Incrementare la portata di rinnovo fino al valore massimo	Riduzione della temperatura dell'aria in ingresso durante il dì
Clima caldo e secco ($-2 < \Delta T < 2^{\circ}\text{C}$)	Ventilazione minima durante il dì e massima durante la notte	Riduzione della temperatura dell'aria in ingresso durante il dì
Clima caldo e umido	Tasso di rinnovo minimo da fornire con ventilazione naturale o meccanica	Raffrescamento attivo e deumidificazione

Quando la temperatura esterna è molto bassa, in alternativa all'apertura delle finestre, che potrebbe dar luogo a correnti fredde, si suggerisce l'utilizzo dei cosiddetti "soffitti diffusi", in grado di iniettare l'aria fresca a bassa velocità attraverso un plenum, a cui sono associate basse perdite di carico. Tali tecnologie, approfondite nel paragrafo 1.3.7, si adattano particolarmente bene ad ambienti con un carico estivo inferiore a 90 W/m^2 [14]. Nei climi temperati, la portata di aria necessaria per l'esercizio del raffrescamento passivo è generalmente superiore a quella richiesta per l'IAQ e, dati i minori gradienti di temperatura tra interno ed esterno, si suggeriscono strategie di ventilazione che incentivino la movimentazione dell'aria, come l'effetto camino. Infine, nei climi caldi e secchi, si raccomanda di effettuare una buona ventilazione notturna, che da sola potrebbe essere in grado di controbilanciare i carichi diurni nell'ipotesi di un edificio ad elevata inerzia termica; viceversa, se l'umidità esterna è molto alta, si consiglia l'installazione di un sistema di ventilazione meccanica con raffrescamento e deumidificazione.

Dal punto di vista qualitativo, il raffrescamento passivo è in grado di compensare carichi di $30\text{-}40 \text{ W/m}^2$; viceversa, seguendo una logica quantitativa, questo potenziale può essere stimato attraverso la procedura sottostante:

- 1) calcolo dell'irradianza totale oraria $I_{tot,i}$ in $[\text{W/m}^2]$ come somma delle componenti diffusa e diretta per tutte le orientazioni dell'edificio (E, N, NE, NW, S, SE, SW, W);
- 2) calcolo della temperatura esterna media T_{ed} in $^{\circ}\text{C}$ per ogni giorno dell'anno;
- 3) calcolo della temperatura esterna media operativa T_{orm} in $^{\circ}\text{C}$ per ogni ora dell'anno in accordo alla norma UNI EN 16798-1 come:

$$T_{orm} = \frac{(T_{ed-1} + 0.8 \cdot T_{ed-2} + 0.6 \cdot T_{ed-3} + 0.5 \cdot T_{ed-4} + 0.4 \cdot T_{ed-5} + 0.3 \cdot T_{ed-6} + 0.2 \cdot T_{ed-7})}{3.8}$$

- 4) calcolo della temperatura minima $T_{i,min}$ e massima $T_{i,max}$ di comfort termico in [°C] in funzione delle categorie descritte nella norma UNI EN 16798-1 come:

$$T_{i,min} = 0.33 \cdot T_{orm} + 18.8 - K$$

$$T_{i,max} = 0.33 \cdot T_{orm} + 18.8 + K$$

con $10 < T_{orm} < 30$ °C e K pari a 2, 3 e 4 rispettivamente per la categoria I, II e III. In particolare, per le nuove costruzioni si consiglia di garantire almeno la classe II, mentre per il risanamento di scuole esistenti può essere tollerata la classe III e superiori.

- 5) calcolo dei carichi solari orari in [W/m²] come:

$$Q_{sol} = I_{tot,i} \cdot g \cdot Y \cdot W / S$$

dove il pedice i indica l'orientazione della superficie finestrata, g il fattore solare del serramento, Y il fattore di ombreggiamento, W l'area finestrata in [m²] e S l'area del pavimento in [m²].

- 6) calcolo dei carichi interni orari in [W/m²] come:

$$Q_{int} = N_p / S \cdot Occ_{sch} \cdot q_{people} + q_{light} \cdot lgt_{sch} + q_{el,equip} \cdot eqp_{sch}$$

dove N_p è il numero delle persone, Occ_{sch} è la programmazione dell'occupazione in funzione della tipologia di edificio in accordo a UNI EN 16798-1, q_{people} è la potenza termica totale emessa da ciascun individuo in [W], q_{light} è la potenza di illuminazione per unità di superficie in [W/m²], lgt_{sch} è la programmazione dell'illuminazione in funzione della tipologia di edificio in accordo a UNI EN 16798-1, $q_{el,equip}$ è la potenza elettrica dell'attrezzatura scolastica per unità di superficie in [W/m²] e eqp_{sch} è la programmazione della stessa in funzione della tipologia di edificio in accordo a UNI EN 16798-1.

- 7) calcolo della temperatura di equilibrio in riscaldamento T_{o-hbp} per ogni ora come:

$$T_{o-hbp} = T_{i-hsp} - \frac{q_i''}{\dot{m}_{min} \cdot c_p + \sum UA}$$

dove q_i'' sono i carichi termici totali in [W] come somma dei carichi solari ed interni, T_{i-hsp} è la temperatura di set-point in riscaldamento, c_p è il calore specifico dell'aria in [J/kg K], UA è il prodotto in [W/K] tra la trasmittanza termica media dell'involucro e l'area dello stesso e \dot{m}_{min} è la portata d'aria minima per l'IAQ in [kg/s].

Come output, l'algoritmo suddivide il numero di ore in cui l'edificio è occupato nei seguenti gruppi:

- quando la temperatura esterna T_e è inferiore a T_{o-hbp} non è richiesto il raffrescamento passivo;
- quando la temperatura esterna è compresa tra il limite inferiore di comfort e la temperatura di equilibrio, ovvero se $T_{o-hbp} \leq T_e < T_{o-hbp} + (T_{i,max} - T_{i,min})$, allora \dot{m}_{min} è in grado di coprire la domanda di raffrescamento;

- c) quando la temperatura esterna si trova all'interno dei limiti di comfort termico, ovvero se $T_{o-hbp} + (T_{i,max} - T_{i,min}) \leq T_e \leq T_{i,max} - \Delta T_{crit}$ con $\Delta T_{crit} = 3 K$, deve essere fornita una portata maggiore rispetto a \dot{m}_{min} , che può essere calcolata come:

$$\dot{m}_{cool} = \frac{q_i}{c_p(T_{i,max} - T_e)} \quad [kg/s]$$

- d) quando la temperatura esterna supera il limite superiore di comfort, cioè se $T_e > T_{i,max} - \Delta T_{crit}$ oppure se l'umidità relativa esterna è superiore all'85%, il raffrescamento passivo non ha alcuna efficacia. Se ciò accade per molte ore dell'anno, non potendo dunque soddisfare i criteri di comfort adattivo, si dovrà ricorrere ad un sistema di raffrescamento attivo, che può integrarsi alla ventilazione naturale o agire indipendentemente da essa.

In alternativa al metodo appena esposto, i serramenti possono essere dimensionati sulla base della portata stimata inizialmente per la salvaguardia dell'IAQ nell'ipotesi di velocità nulla del vento e con una differenza di temperatura tra interno ed esterno pari a 3 K. Ciò, infatti, comporta una sovrastima dell'area di apertura che permette di esercitare il raffrescamento passivo indipendentemente dal calcolo di \dot{m}_{cool} , sebbene con intensità minore rispetto a quanto necessario.

Spetterà dunque al progettista stabilire la procedura da seguire per il dimensionamento del sistema di ventilazione naturale, in funzione della qualità ambientale interna attesa e delle ore di surriscaldamento residue tollerate. Al fine di ridurne l'entità, si suggerisce di modificare i dati di input al calcolo di \dot{m}_{cool} , mediante l'installazione di sistemi di ombreggiatura solare e riducendo i carichi interni.

Da questo punto di vista, la ventilazione notturna può dar luogo a benefici ancor più importanti, poiché consente di sfruttare la capacità di raffrescamento dell'aria in ingresso durante la notte per smaltire i carichi termici del giorno precedente. L'interazione della stessa con la massa dell'edificio può essere indiretta o diretta, a seconda che il flusso venga veicolato o meno attraverso cavedi presenti sotto il pavimento e/o sopra il soffitto, come rappresentato in Figura 1.24:

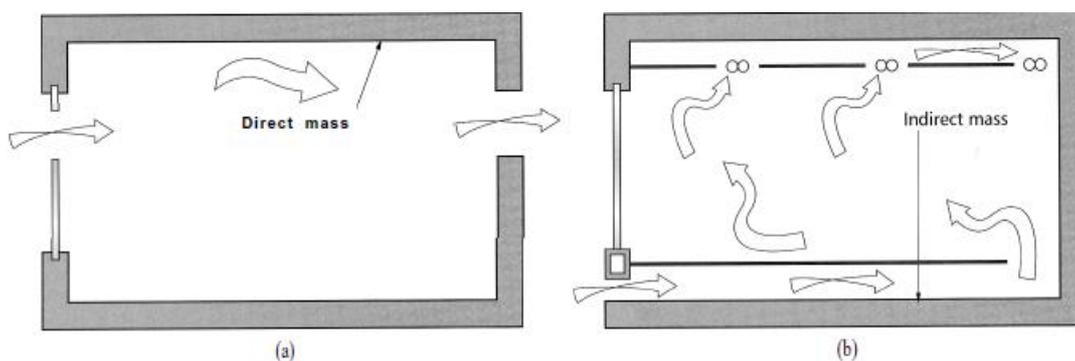


Figura 1.24. Scambio termico diretto (a) o indiretto (b) [35]

Entrambi i metodi si adattano bene alla VMC, mentre con la ventilazione naturale lo scambio termico diretto viene preferito rispetto a quello indiretto, in quanto comporta minori perdite di carico. Ulteriori miglioramenti possono essere raggiunti attraverso un incremento della capacità termica dell'edificio, ad

esempio aggiungendo delle partizioni interne; sono invece da evitare pavimenti sopraelevati, mentre per i controsoffitti si consigliano materiali conduttivi piuttosto che isolanti, in modo da incentivare lo scambio termico.

Di notte, non essendo presente alcun rischio legato alle correnti fredde, la portata di aria in ingresso può essere incrementata fino a 10 h^{-1} , dando luogo ad un potenziale di raffrescamento stimabile come [36]:

$$\theta_v = \frac{1}{3} N \cdot V \cdot (T_f - T_e)(1 - e^{-x}) \quad [W]$$

dove θ_v è la potenza termica scambiata per ventilazione in [W], N è il numero di ricambi orari in [h^{-1}], V è il volume dell'ambiente considerato in [m^3], T_f è la temperatura superficiale interna della struttura soggetta a raffrescamento in [$^{\circ}\text{C}$], T_e è la temperatura esterna in [$^{\circ}\text{C}$] e x è un esponente definito come:

$$x = \frac{4.8 \cdot A}{1/3 N \cdot V} \quad [-]$$

dove A è la superficie dell'ambiente in [m^2].

Prima di procedere con l'esercizio della ventilazione notturna, devono essere verificati tutti i requisiti di sicurezza associati all'apertura delle finestre durante le ore di non occupazione, che potrebbero limitare la ventilazione.

Indipendentemente dal sistema installato, è necessario evitare fenomeni di eccessivo raffreddamento, con conseguente richiesta di riscaldamento durante le prime ore di lezione. A tal fine, si suggerisce di controllare la ventilazione mediante dei sensori di temperatura installati all'interno degli ambienti o, meglio ancora, inseriti direttamente nella massa dell'edificio ad una profondità rappresentativa della capacità di accumulo della stessa (di solito 25-50 mm).

1.3.7) Correnti fredde

Come già ampiamente anticipato, le correnti fredde rappresentano un **discomfort termico localizzato** a cui gli occupanti possono essere soggetti durante la **stagione invernale** a causa dell'apertura dei serramenti. Viceversa, nei mesi estivi la movimentazione sostenuta dell'aria favorisce la percezione di comfort termico, a patto che i flussi in ingresso non siano tali da generare **rumori fastidiosi o provocare lo spostamento di carte e pagine**. Ad esempio, in riferimento alla Figura 1.25, ad una velocità di 0.25 m/s corrisponde una capacità di raffrescamento pari ad una diminuzione di temperatura di 1 K.

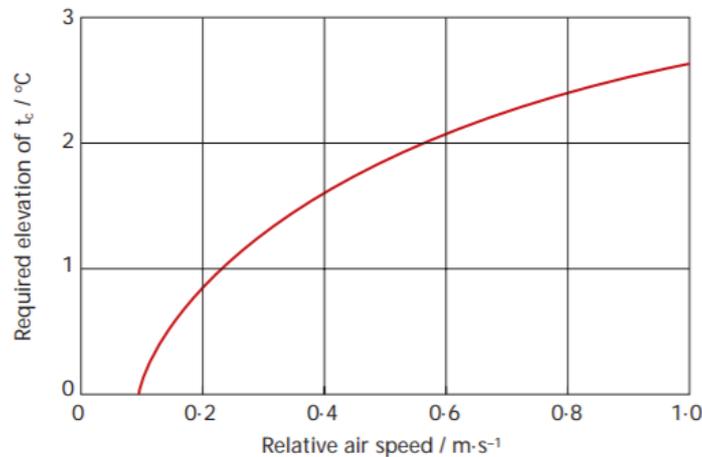


Figura 1.25. Effetto della velocità dell'aria sulla temperatura interna [21]

Tali valori sono però accettabili solo nella stagione estiva.

Per limitare l'insorgere di correnti fredde durante la stagione invernale, è possibile sfruttare, ove possibile, **l'effetto Coanda**: l'aria fredda scivola lungo il soffitto e si miscela con quella interna, riducendone la velocità e garantendo il comfort termico. Il fenomeno, però, richiede l'utilizzo di aperture poste nella parte superiore dei locali, o di apposite griglie, con cui poter effettuare la ventilazione incrociata e l'effetto camino [3]. Si osserva, inoltre, come ambienti con destinazioni d'uso differenti abbiano diverse velocità limite tollerabili.

Se con i sistemi meccanici è possibile controllare la velocità del getto d'aria in uscita dalle bocchette, nel caso della ventilazione naturale la probabilità di discomfort dovuto alle correnti fredde dipende dalle caratteristiche della portata di rinnovo. In particolare, una delle situazioni più delicate è rappresentata dalle mezze stagioni, ovvero quando l'impianto di riscaldamento è spento e la temperatura esterna minima raggiunge un valore di circa 5 °C. In questi casi bisogna evitare che l'aria di rinnovo venga fornita, in corrispondenza degli occupanti considerati seduti, ad una temperatura inferiore di 5 K rispetto alla temperatura operativa, pari a 20 °C per i normali ambienti di insegnamento. Si rende quindi necessaria una stima delle condizioni a cui si trova la portata di rinnovo in prossimità degli utenti, mediante modelli CFD oppure utilizzando opportuni strumenti, come il "*Window and damper draught calculator*", sviluppato dall'ESFA in collaborazione con BB101 2018 [3]. Questo strumento chiede come dati in ingresso la tipologia di apertura e le caratteristiche geometriche della stessa, la temperatura interna, il numero di occupanti e il tasso di ventilazione per persona; come output restituisce l'andamento della temperatura del getto d'aria a 1.4 m di altezza (riferimento per le scuole superiori) e a 1.1 m di altezza (riferimento per le scuole di ordine inferiore) nell'ipotesi di flusso completamente turbolento. I requisiti di comfort relativi alle correnti d'aria si considerano soddisfatti se, per una qualsiasi temperatura esterna maggiore di 5 °C, i due suddetti output superano la temperatura minima ammessa (15°C). In caso di esito negativo, si suggerisce di modificare i parametri di input, ovvero la tipologia e/o le caratteristiche geometriche dei serramenti, fino a soddisfare i precedenti criteri.

Una tecnologia alternativa a quelle finora analizzate, in grado di minimizzare il rischio di discomfort in edifici non residenziali come scuole ed uffici, è costituita dai cosiddetti **soffitti diffusi o sospesi**. Essi consistono in una sorta di plenum in cui l'aria fresca si accumula, si preriscalda leggermente sfruttando la capacità termica del soffitto stesso e infine fluisce nell'ambiente occupato attraverso dei fori presenti nella lastra sospesa, come rappresentato in Figura 1.26.

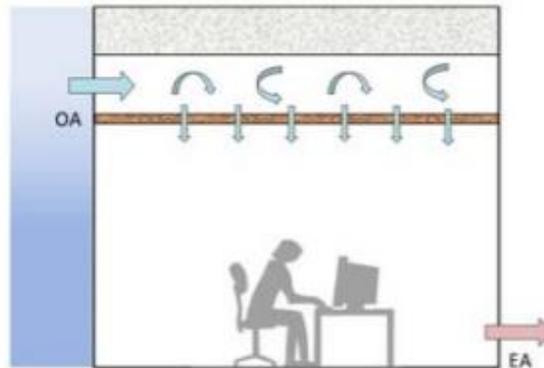


Figura 1.26. Principio di funzionamento dei soffitti diffusi [37]

La movimentazione dell'aria è dovuta alla differenza di pressione che insiste tra il plenum e lo spazio occupato, che si traduce in un fenomeno di ricircolo tra il flusso freddo discendente dai fori e quello caldo ascendente dalla zona riscaldata. Data la grande superficie di passaggio, le perdite di carico sono molto piccole e permettono l'esercizio della ventilazione naturale anche in mancanza di vento. Ulteriori vantaggi consistono in una bassa rumorosità e in una buona capacità di raffrescamento, anche notturno; il problema principale, invece, risiede nel rischio di condensazione superficiale, soprattutto se il materiale della lastra è caratterizzato da un'elevata conduttività termica, come nel caso di lastre in alluminio. Si consigliano pertanto pannelli in lana di legno e cemento, tali da garantire un'altezza minima del plenum di 20 cm e perdite di carico non superiori a 10 Pa [37].

Questo sistema, quindi, si comporta come un diffusore e garantisce una distribuzione dell'aria omogenea senza alcuna direzione prefissata e a bassa velocità. Ne consegue l'assenza quasi totale di discomfort dovuto a correnti fredde e all'asimmetria radiante, nonostante l'aria esterna si trovi a temperature molto basse.

1.3.8) Controllo automatico della ventilazione naturale

Il controllo automatico della ventilazione naturale può avvenire tramite dei **sistemi BMS (Building Management Systems)** oppure predisponendo per ciascuna delle aperture un **attuatore dedicato**. Questo può essere di diversi tipi, tra cui si evidenziano:

- attuatori lineari a pistoncini, adatti per lucernari e finestre molto alte;
- attuatori con trasmissione a catena, applicati a finestre di piccole dimensioni;
- attuatori a cremagliera e pignone, utilizzati per serramenti molto leggeri;
- attuatori rotativi, per serrande e griglie.

È fondamentale che la movimentazione dei serramenti avvenga con il minimo rumore possibile e garantendo all'utente la possibilità di attivare una ventilazione aggiuntiva "by-passando" il controllo automatico, nel rispetto di tutte le disposizioni normative riguardanti l'antincendio e la sicurezza, soprattutto nell'ipotesi in cui venga esercitata la ventilazione notturna.

Le strategie di controllo per l'azionamento automatico dei serramenti sono molteplici e possono interagire o meno con sensori per il monitoraggio degli inquinanti e dei parametri ambientali interni come temperatura e umidità relativa. I sistemi BMS, più efficaci rispetto ai singoli attuatori, sono in grado di controllare e di gestire le aperture e tutti gli impianti presenti nell'edificio come un unico sistema integrato che si può interfacciare con sistemi di misura e/o di rilevazione delle presenze. Durante i mesi più caldi si consiglia di far lavorare il sistema di controllo delle aperture anche durante le ore di non occupazione in modo da sfruttare il fenomeno di free cooling, fino al raggiungimento di una temperatura minima di set-point fissata in funzione delle temperature massime diurne raggiunte nei giorni precedenti. L'automazione dei serramenti può avvenire in modalità on/off, ovvero da tutto chiuso a tutto aperto e viceversa, oppure secondo un numero limitato di posizioni prefissate. In entrambi i casi, sebbene l'interfaccia di controllo sia molto semplice, non è possibile effettuare una modulazione continua della portata in funzione dei parametri monitorati. Una tale regolazione si adatta a spazi grandi e di passaggio, come atri o corridoi, mentre nelle aule si suggerisce l'implementazione di attuatori a posizione variabile con regolazione continua del tasso di rinnovo.

Per ulteriori approfondimenti circa le logiche di controllo degli azionamenti meccanici e dei sistemi BMS si rimanda a letture specialistiche.

1.4) Ventilazione meccanica

Nell'ambito della ventilazione meccanica controllata (VMC), le presenti linee guida vogliono fornire le informazioni necessarie per prevenire tutte le problematiche derivanti da un'inadeguata progettazione e/o da un errato esercizio degli impianti, le quali hanno ripercussioni negative sia sul corretto funzionamento degli stessi che sulla qualità ambientale all'interno degli edifici scolastici. La VMC può infatti rappresentare un'arma a doppio taglio: da un lato appare indispensabile nella salvaguardia dell'IEQ e nella realizzazione di nuove costruzioni a ridotto consumo energetico, dall'altro può diventare essa stessa una possibile fonte di discomfort e di lamentele, se non correttamente esercita e mantenuta.

Fermi restando i criteri di scelta del sistema di ventilazione evidenziati al paragrafo 1.2, si vuole ancora una volta sottolineare come, a differenza dell'aerazione naturale, la ventilazione meccanica permetta di:

- controllare il ricambio d'aria in funzione delle reali necessità degli occupanti e indipendentemente dalle condizioni climatiche esterne;
- tutelare il manufatto edilizio e la salute umana anche in zone fortemente inquinate, mediante l'impiego dei filtri;
- massimizzare l'efficienza di ventilazione, garantendo i livelli di qualità ambientale interna richiesti dal committente con i ricambi d'aria minimi consentiti;
- contenere i consumi energetici grazie al recupero termico;
- rispettare tutti i parametri di comfort in relazione alla temperatura, all'umidità relativa, alle correnti d'aria e all'acustica.

Per soddisfare i suddetti criteri, va prestata attenzione sia al dimensionamento dei componenti d'impianto e alla disposizione degli stessi affinché non diano luogo a rumore, vibrazioni o a qualsiasi altro fenomeno di discomfort localizzato, che alla modalità di controllo della ventilazione. Prima della messa in servizio è inoltre necessario assicurarsi del corretto bilanciamento tra immissione ed estrazione e che la posizione dei terminali sia tale da promuovere un efficace lavaggio degli ambienti. Il buon funzionamento del sistema di ventilazione, infine, non può prescindere dalle operazioni di pulizia e manutenzione, soprattutto alla luce della situazione emergenziale associata alla pandemia da Covid-19.

Tali aspetti verranno esplorati in dettaglio nei paragrafi successivi, mentre verranno tralasciate le procedure di dimensionamento dei vari componenti e verranno menzionate solo alcune delle numerose configurazioni impiantistiche ad oggi implementabili. Ciò nonostante, non mancheranno delle considerazioni relative alle caratteristiche di quei componenti, come recuperatori di calore, ventilatori, filtri, canali e terminali, che condizionano le prestazioni energetiche, ambientali ed acustiche dei sistemi di ventilazione meccanica.

I **sistemi di ventilazione meccanica** possono essere distinti in due grandi famiglie:

- **sistemi centralizzati o canalizzati:** distribuiscono la portata d'aria nei vari ambienti attraverso una rete di condotte di mandata e di ripresa, come rappresentato in Figura 1.27 (a sinistra). Caratterizzati da un'ottima efficienza di ventilazione, trovano spazio soprattutto nelle nuove

costruzioni, in quanto gli ingombri elevati e gli alti costi d'investimento ne limitano spesso l'applicazione all'esistente;

- sistemi decentrali o non canalizzati:** nati per soddisfare il ricambio d'aria di singoli ambienti, consistono in dispositivi di ventilazione *stand-alone* che realizzano l'immissione e/o l'estrazione puntuale senza l'impiego di canali di distribuzione (Figura 1.27 a destra). Data la facilità di installazione e i bassi costi d'investimento, vengono preferiti soprattutto nelle ristrutturazioni di edifici esistenti.



Figura 1.27. Sistema di ventilazione centralizzato (a sinistra) e sistema decentrale (a destra) [39]

A prescindere dal tipo di sistema e dalla logica di controllo del ricambio d'aria, il calcolo della portata di progetto avviene in modo analogo a quanto visto per la ventilazione naturale e deve essere conforme alle medesime norme, come la UNI 10339 [6] e la UNI EN 16798-1 [7]. Si precisa che, nel caso in cui la VMC venga utilizzata per soddisfare anche il fabbisogno di riscaldamento e/o raffrescamento, le portate in gioco sono normalmente più elevate di quelle richieste per garantire e mantenere un'accettabile IAQ. In tali configurazioni, una parte dell'aria estratta dagli spazi occupati può essere ricircolata e miscelata con quella esterna: ne derivano maggiori ingombri delle canalizzazioni e logiche di controllo dominate sia dai parametri termo-igrometrici che di IAQ. Ciò nonostante, i principi di dimensionamento e di regolazione della portata sono comuni a tutte le configurazioni, seppur con sfumature diverse a seconda del numero di componenti dell'impianto e della complessità degli algoritmi di controllo. Di conseguenza, ai fini della presente analisi, verranno affrontate le criticità associate alle fasi di progettazione, esercizio e manutenzione dei sistemi di ventilazione meccanica, siano essi **passivi (solo ricambio d'aria)** o **attivi (ricambio d'aria e condizionamento)**, ma senza entrare nel dettaglio della singola tecnologia.

Di seguito viene proposta una breve introduzione agli impianti aerulici centralizzati, i quali rappresentano la soluzione migliore per salvaguardare l'IAQ in edifici ad uso scolastico. Viceversa, verrà dedicato un paragrafo ai sistemi decentrali come soluzioni da considerare quasi esclusivamente negli interventi di riqualificazione dell'esistente.

1.4.1) Sistemi centralizzati di ventilazione meccanica controllata

I sistemi centralizzati possono essere discretizzati in funzione dei processi che avvengono al loro interno. In particolare, con il termine "**passivi**" vengono identificati tutti quegli impianti di ventilazione che realizzano un **rinnovo dell'aria senza che questa venga trattata**, ma sottoponendola semplicemente ad

un processo di filtrazione e di recupero termico; in tali contesti, la VMC effettua solo il ricambio dell'aria e viene dimensionata sulla base delle portate prescritte per l'IAQ e il benessere delle persone, in conformità alle norme UNI 10339 e UNI EN 16798-1. Viceversa, il termine **“attivi”** viene attribuito agli **impianti aeraulici in grado di riscaldare, raffrescare, umidificare e/o deumidificare l'aria di mandata**, mediante saturatori e batterie di scambio termico installate nella cosiddetta “unità di trattamento dell'aria” (UTA) o attraverso l'integrazione con una pompa di calore. Queste tecnologie, caratterizzate da un maggiore consumo di energia, comprendono **sistemi a tutta aria e sistemi misti aria-acqua**: i primi utilizzano l'aria per il controllo di tutti gli scambi energetici e di massa, mentre i secondi sfruttano contemporaneamente come fluidi termovettori l'acqua per la copertura del carico sensibile e l'aria (detta primaria) per la ventilazione e la gestione del carico latente. In entrambi i casi, dunque, oltre all'ingresso di aria fresca e al recupero di calore dall'aria esausta, vi è anche il trattamento attivo dell'aria di immissione, affinché questa garantisca le condizioni di comfort termo-igrometrico negli ambienti interni.

Gli impianti attivi elaborano una portata maggiore rispetto a quelli passivi e come tali possono prevedere il ricircolo di una frazione dell'aria esausta. Ciò introduce ulteriori problematiche, approfondite nei paragrafi successivi, in quanto l'aria ripresa dagli ambienti interni trascina con sé una parte degli inquinanti ivi presenti. Pertanto, per le aule scolastiche si consiglia, ove possibile, di evitare il ricircolo e di utilizzare solo aria fresca, verificando che le portate prelevate dall'esterno non siano mai inferiori a quelle indicate dalla normativa vigente relativamente alla qualità ambientale interna.

Come già accennato, la presente trattazione vuole prescindere dall'analisi delle singole configurazioni impiantistiche, preferendo ad essa degli approfondimenti mirati alle problematiche che tali configurazioni hanno tra loro in comune. Ciò nonostante, si sottolinea la volontà di assumere come riferimento dei sistemi che rappresentino lo stato dell'arte della ventilazione meccanica controllata e che quindi siano garanti di un'elevata efficienza energetica e di una qualità ambientale interna a servizio delle esigenze degli utenti. Alla luce di questo, si presuppone che le suddette tecnologie siano caratterizzate da:

- **immissione ed estrazione centralizzata**, che permettono di posizionare i terminali in modo opportuno a seconda della geometria e dei carichi interni, dando luogo a diversi modelli di ventilazione. Si distinguono, in particolare, la ventilazione a miscelazione a la ventilazione a dislocamento, di cui si discuterà più diffusamente al paragrafo 1.4.2. Viceversa, la sola immissione di aria fresca o la sola estrazione di aria esausta sono dei processi che richiedono la presenza di adeguate aperture e quindi l'integrazione della ventilazione naturale e come tali verranno affrontati più in dettaglio nei capitoli dedicati ai sistemi ibridi;
- **variazione della portata d'aria immessa nei singoli ambienti**, mediante apposite bocchette oppure attraverso cassette terminali di zona regolate in funzione dei segnali provenienti dagli ambienti condizionati; al contempo, dei ventilatori a velocità variabile, sia in mandata che in ripresa, permettono di mantenere invariata la pressione statica nei rispettivi canali, garantendo così il bilanciamento dell'impianto aeraulico. Queste tecnologie, note in letteratura con l'acronimo **VAV (Variable Air Volume)**, presentano innumerevoli vantaggi rispetto ai sistemi CAV a portata costante (*Costant Air Volume*), tra cui l'ottimo controllo della temperatura, la riduzione degli ingombri e la diminuzione dei consumi energetici.

Dunque, gli impianti VAV sono provvisti di un ben determinato sistema di controllo con cui viene regolata la portata d'aria. Nonostante il metodo descritto in precedenza rappresenti la soluzione più innovativa ed efficiente, si riconosce nella regolazione delle serrande un'altra procedura comunemente utilizzata [40]. Per ulteriori considerazioni relative ai sistemi di controllo della portata, si rimanda al paragrafo 1.4.4.

Nello specifico, gli **impianti VAV** possono essere suddivisi in più tipologie, tra cui si evidenziano [41]:

- **a singolo canale:** l'aria viene distribuita nei locali attraverso semplici condotti, mentre nelle cassette terminali di zona si ha solo una variazione della portata;
- **con post-riscaldamento di zona:** nelle cassette terminali è presente una batteria di riscaldamento che garantisce una maggiore flessibilità in termini di portata e temperatura, soprattutto per zone soggette a variazione del carico;
- **con unità di ricircolo locale:** l'UTA elabora solamente aria esterna, detta aria primaria, che viene poi inviata a speciali cassette di zona, indicate con l'acronimo FAT (*fan assisted terminal*). Queste sono dotate di un piccolo ventilatore che permette di ricircolare una parte dell'aria di ripresa dalla zona, di miscelarla con l'aria primaria e di reimmetterla in ambiente. Anche in questo caso è possibile prevedere una batteria di post-riscaldamento;
- **a doppio canale:** sono costituiti da una rete di distribuzione a doppio canale in cui circolano separatamente aria fredda e aria calda; la miscelazione avviene in apposite cassette in prossimità delle zone termiche.

Sebbene gli impianti a doppio canale realizzino un controllo più accurato dei parametri ambientali interni, essi trovano ancora poca diffusione, a causa di un maggiore consumo energetico (fino al 30% in più) rispetto ai sistemi a singolo canale. Quest'ultimi, al contrario, si adattano molto bene agli edifici scolastici e permettono di contenere sia i costi d'investimento che di esercizio.

In Figura 1.28 viene proposto lo schema completo di un impianto VAV a canale singolo, a cui segue una breve descrizione del funzionamento, dei componenti principali e della terminologia adottata.

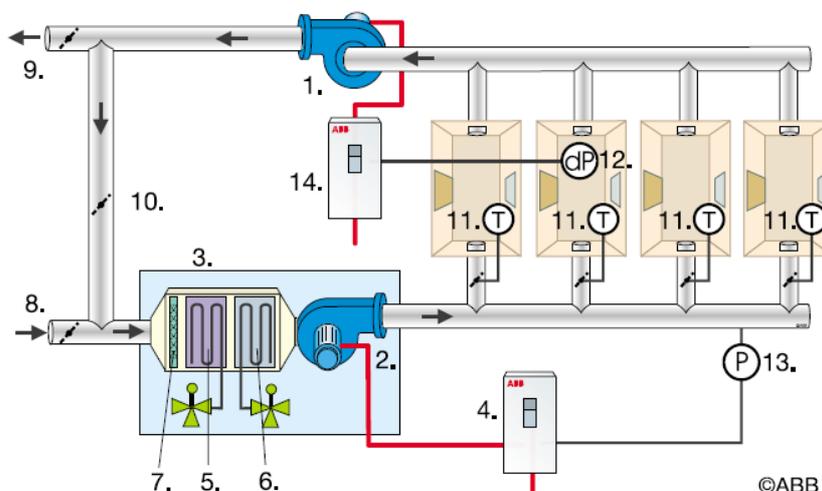


Figura 1.28. Sistema VAV con ventilatori a velocità variabile [40]

L'aria esterna (8) e l'eventuale aria di ricircolo (10) si miscelano e il flusso risultante viene convogliato nell'UTA (3) dove è possibile effettuare la filtrazione (7), la regolazione della temperatura attraverso batterie di riscaldamento (5) e raffrescamento (6) e il controllo dell'umidità tramite opportuni dispositivi (non presenti in Figura 1.28). La portata immessa in ciascuna zona viene regolata mediante le rispettive serrande o cassette VAV, in funzione dei parametri interni monitorati da appositi sensori (11). Secondo una logica retroattiva, la velocità del ventilatore di mandata (2) viene controllata mediante un azionamento in corrente alternata (4), al fine di mantenere costante la pressione nel relativo canale. Questa viene rilevata da un sensore (13) installato nel canale di mandata. Analogamente, un secondo azionamento (14) mantiene costante il differenziale di pressione (12) rispetto alla pressione esterna e regola di conseguenza la velocità del ventilatore di estrazione (1). Infine, una parte dell'aria può essere ricircolata, mentre la restante, prima di essere espulsa (9), può scambiare calore con il flusso in ingresso in un opportuno recuperatore di calore (non presente in Figura 1.28).

Si osserva infine come, di tutti questi componenti, quelli comuni a tutti gli impianti VMC e che influiscono maggiormente sulla qualità dell'aria interna sono i filtri, le aperture di espulsione e di presa dell'aria esterna, il ricircolo e/o il recuperatore di calore, i ventilatori, i terminali di immissione ed estrazione dell'aria interna e i canali di distribuzione. Per ulteriori approfondimenti relativi ad ognuno dei suddetti elementi si rimanda ai paragrafi che seguono.

1.4.1.1) Bocchette di presa aria esterna e di espulsione

Il **corretto posizionamento delle bocchette esterne** riveste un ruolo chiave nella **definizione del carico inquinante cui il sistema di filtrazione è sottoposto** e quindi dell'IAQ risultante. Relativamente ai sistemi centralizzati, le prese per l'aria esterna richiedono una distanza di almeno 8 metri in orizzontale da parcheggi di uso frequente, aree di raccolta rifiuti, strade, tombini fognari, uscite di comignoli e fonti di inquinamento analoghe [42, 43]. Simili precauzioni devono essere adottate in prossimità di torri di raffreddamento e di una qualsiasi altra fuoriuscita di gas esausti e vapori, per evitare che nell'aria di apporto si riversino contaminanti ed impurità responsabili della diffusione del batterio Legionella. Ancora, nessuna apertura dovrebbe essere posizionata su una facciata esposta ad una sorgente inquinante, come una fabbrica o una strada trafficata. Inoltre, la parte inferiore delle bocchette dovrebbe sempre trovarsi ad una distanza dal terreno di almeno 3 metri o pari a 1,5 volte lo spessore massimo annuale raggiunto dalla neve, come specificato nel Protocollo CasaClima School [15]. Analoghe considerazioni valgono nel caso in cui l'aspirazione avvenga al di sopra di un tetto o di una copertura (qui la distanza minima in assenza di neve può essere ridotta ad 1 metro). Per gli edifici esistenti sono previsti dei semplici accorgimenti con cui poter verificare le condizioni di cui sopra, come le estensioni da applicare o sugli ingressi per l'aria esterna del sistema HVAC oppure sugli scarichi delle torri di raffreddamento.

Si raccomanda di proteggere le bocchette dalla penetrazione di acqua in qualunque forma, come pioggia, vento e neve, e di impedire l'ingresso di polveri dimensionando l'apertura per una velocità massima dell'aria pari a 2 m/s. Ancora, si raccomanda di disporre le prese dell'aria esterna sul lato dell'edificio rivolto verso la direzione principale del vento, al riparo dalla radiazione solare diretta, e di dotare le stesse di una maglia a rete di almeno 13 mm di spessore per evitare il passaggio di piccoli animali o uccelli.

Il problema principale legato al **posizionamento delle bocchette** consiste nel **possibile cortocircuito tra aspirazione ed espulsione**: a tal fine, si suggerisce di realizzare l'aspirazione da un lato dell'edificio e l'espulsione in copertura, verificando l'assenza di ulteriori fonti di emissioni inquinanti che potrebbero comunque compromettere la qualità dell'aria in ingresso. Ciò nonostante, se l'aria esausta non è eccessivamente inquinata (EHA 1 o EHA 2), è possibile effettuare lo scarico direttamente da una delle facciate dell'immobile a patto che [42, 43]:

- vi sia una distanza di almeno 8 metri tra l'espulsione e un qualsiasi edificio adiacente;
- vi sia una distanza di almeno 2 metri da una bocchetta di aspirazione presente sul medesimo muro, posta possibilmente al di sotto dello scarico stesso;
- la velocità dell'aria in corrispondenza dell'espulsione sia maggiore o uguale a 5 m/s e la portata non superi 0.5 m³/s.

Per la definizione della distanza minima raccomandata (L) tra un'apertura di aspirazione e una di scarico si rimanda ai grafici e agli esempi contenuti nella norma UNI CEN/TR 16798-4. In alternativa, è possibile eseguirne un calcolo accurato mediante la seguente formula [11]:

$$L = 0.04 \cdot \sqrt{Q} \cdot (\sqrt{DF} - U/2) \quad [m]$$

dove:

- Q è il volume di aria esausta, in L/s;
- DF è il fattore di diluizione, indicante la quota parte di aria esausta che viene ripresa dalla bocchetta di aspirazione e i cui valori sono opportunamente tabellati in ASHRAE 62.1;
- U è la velocità del flusso di aria allo scarico, in m/s.

I criteri visti finora sono applicabili anche ai sistemi di ventilazione decentrale a singolo flusso e, più in generale, a qualsiasi tipologia di apertura verso l'esterno, sebbene venga sempre richiesto il rispetto di eventuali vincoli progettuali e architettonici vigenti in funzione del caso considerato.

1.4.1.2) Recuperatori di calore

Gli scambiatori di calore a recupero, o più semplicemente **recuperatori**, permettono il **trasferimento di energia termica dalla portata di aria esausta in uscita a quella dell'aria fresca in ingresso**. I parametri che condizionano la scelta di un dispositivo sono soprattutto l'efficienza, la disposizione dei flussi, l'ermeticità e le perdite di carico.

L'efficienza del recuperatore, definita come il rapporto tra l'energia termica effettivamente scambiata e quella massima scambiabile, varia in funzione della tecnologia utilizzata, della temperatura dei due flussi e della direzione in cui essi scorrono. È ben noto, infatti, come la configurazione in controcorrente comporti, a parità di condizioni di esercizio, un rendimento maggiore rispetto a quella in parallelo. Per quanto riguarda il primo aspetto, invece, l'impiego di membrane polimeriche permeabili consente il recupero sia del calore sensibile che del calore latente, migliorando il rendimento complessivo dell'impianto. Il principio di funzionamento consiste nel trasferimento dell'umidità per diffusione sotto

forma di vapore acqueo dal lato della pressione del vapore più alto a quello più basso. Un ulteriore vantaggio lo si ha in inverno nei climi molto freddi e secchi, in quanto l'aria in ingresso subisce un processo di umidificazione preservando il comfort termo-igrometrico interno. La membrana è inoltre dotata di un rivestimento speciale, che previene la formazione di batteri e muffe.

Un altro aspetto da considerare nella scelta della tecnologia più performante riguarda **le perdite di carico**. Queste dovrebbero essere contenute il più possibile, in quanto, altrimenti, andrebbero a penalizzare il consumo energetico del ventilatore. A tal fine, si consiglia di limitare la velocità dei flussi e di lavorare con superfici di scambio maggiori, le quali, però, comportano spazi e costi maggiori; ancora, l'accumulo di polvere tra le alette potrebbe far aumentare la caduta di pressione: si consiglia pertanto una pulizia dello scambiatore da effettuarsi almeno una volta l'anno.

Nei climi molto freddi o molto caldi, il recupero termico rappresenta uno strumento di fondamentale importanza per garantire elevate prestazioni energetiche degli edifici, assicurando al contempo una buona qualità dell'aria. Ulteriori benefici possono essere conseguiti attraverso il controllo della valvola di bypass dello scambiatore, per sfruttare appieno le potenzialità del *free cooling* estivo riducendo così i carichi interni da smaltire durante la stagione di raffrescamento. Per tutti questi motivi, il Regolamento (UE) n. 1253/2014, recante attuazione della direttiva Ecodesign 2009/125/CE, ha reso obbligatoria, a partire dal 1° gennaio 2016, la progettazione e la successiva commercializzazione di unità di ventilazione non residenziali dotate sia di recuperatore termico che di valvola di bypass [44].

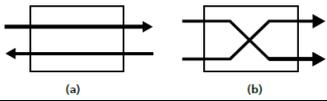
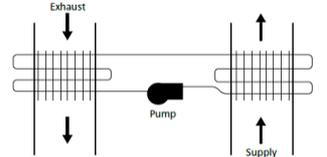
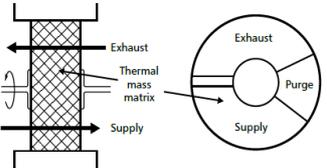
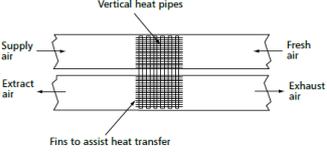
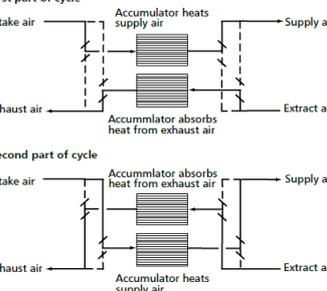
Un altro aspetto molto importante del recuperatore di calore consiste nell'**ermeticità dello scambiatore**, approfondita nella norma UNI EN 16798-3, e nelle condizioni di pressione atte a minimizzare la contaminazione dell'aria fresca in ingresso. Ad esempio, se l'aria estratta è di categoria ETA 2, si consiglia di mantenere in sovrappressione il lato di immissione del recuperatore di calore. Ulteriori considerazioni, riguardanti le operazioni di pulizia e manutenzione e la gestione dei recuperatori durante la fase di emergenza sanitaria da Covid-19, verranno affrontate nei capitoli dedicati.

Nonostante lo scambio termico non abbia delle ripercussioni considerevoli sulla qualità dell'aria interna, è importante garantire delle prestazioni minime da parte dei recuperatori, affinché si abbiano dei benefici non solo in termini di IAQ, ma anche energetici e quindi economici. A tale proposito, il già citato regolamento (UE) n. 1253/2014 impone, per unità di ventilazione con flusso bidirezionale, un'efficienza minima del recuperatore pari al 73%, ad eccezione degli scambiatori a fluido termovettore per i quali il limite inferiore è del 68%.

Inoltre, si raccomanda l'adozione di un dispositivo per la protezione dal ghiaccio e l'installazione di scambiatori rigenerativi per gli edifici posti in zona climatica F, così come previsto anche dalla Direttiva Tecnica Nuovi Edifici di CasaClima [45].

La Tabella 1.6 propone un confronto tra i più comuni dispositivi di recupero termico [35].

Tabella 1.6. Tecnologie di recupero termico [35]

Tipologia	Efficienza [%]	Perdite di fuga [%]	Perdite di carico [Pa]	Metodi di controllo	Note
Scambiatore a piastre in controcorrente (a) o a flussi incrociati (b) 	< 90 (a) < 70 (b) sensibile	0 - 5	25 - 370	Bypass	Non ci sono parti in movimento. Pulizia molto semplice
Scambiatore con circuito intermedio 	50 - 70 sensibile	0	100 - 500	Bypass e pompa del circuito secondario	Il circuito secondario con acqua glicolata dà molta flessibilità. L'aria esausta è sempre separata da quella fresca.
Scambiatore rotativo 	65 - 90 sensibile + latente	1 - 10	100 - 170	Bypass e velocità di rotazione della ruota	Scambio di calore latente e sensibile. Perdite di fuga importanti e contaminazione dell'aria fresca. Pulizia difficile.
Scambiatore a tubi di calore 	50 - 70 sensibile	0	100 - 500	Angolo di inclinazione del tubo di calore	Elevati costi d'investimento.
Scambiatore con accumulatore 	85 - 95 sensibile	1 - 5	70 - 300	Frequenza di commutazione dei circuiti	Elevati costi d'investimento ma elevata efficienza. Autopulizia dei canali ma possibile contaminazione dell'aria in ingresso.

1.4.1.3) Filtri

I **filtri** presenti all'interno della VMC devono essere in grado di **abbattere efficacemente le particelle PM10, PM2.5 e PM1** e di **impedire l'ingresso di pericolosi gas come l'ozono (O₃), il biossido di zolfo (SO₂) e il biossido di azoto (NO₂)**. Per quanto riguarda l'abbattimento del particolato, la scelta di dispositivi poco efficienti si ripercuote negativamente sulle condizioni igieniche dei canali di ventilazione, a causa del possibile accumulo di polveri negli stessi. Ciò è dovuto all'incapacità del filtro di controllare il passaggio delle particelle fini e ultrafini, con conseguente aumento dei costi di pulizia e manutenzione, oltre ai rischi connessi alla ritenzione dell'umidità da parte delle polveri e alla possibile crescita microbica all'interno dei canali. Viceversa, la scelta di un dispositivo troppo performante, se da un lato garantisce elevati livelli di IAQ, dall'altro penalizza fortemente il consumo energetico dell'impianto HVAC, a causa di un incremento considerevole delle perdite di carico. È quindi necessario ricercare il **migliore compromesso tra rendimento, perdite di carico e costi di gestione e manutenzione**: lo studio di Burroughs [47] conferma come questo sia rappresentato dai filtri MERV 13-14 in conformità allo Standard ASHRAE 52.2 [46]. Un'ulteriore ricerca condotta da Ruan & Rim [48] afferma che, se le concentrazioni esterne di PM2.5 sono molto elevate, conviene utilizzare due filtri con efficienza superiore a MERV 11 e ridurre le portate di ventilazione al di sotto di 8 L/s per persona.

Si osserva, inoltre, come i costi annuali di esercizio abbiano un peso ben maggiore rispetto al costo iniziale di investimento: per questo motivo, a parità di efficienza, **la scelta del filtro** dovrebbe avvenire non tanto sulla base del costo d'acquisto, quanto piuttosto **sui valori della caduta di pressione iniziale e finale dichiarati dal produttore, che devono essere più piccoli possibile**. Un ulteriore elemento da considerare risiede nella velocità con cui il flusso d'aria attraversa l'apparato di filtrazione, che dipende chiaramente dalla sezione trasversale delle condotte in corrispondenza del banco filtri: ad esempio, è sufficiente aumentarne di poco le dimensioni per dar luogo ad una diminuzione importante della velocità e quindi delle perdite di carico.

In Figura 1.29 viene proposto lo schema di un impianto VMC, in cui si sottolinea la presenza dell'apparato filtrante a monte dell'UTA. Ulteriori banchi di filtrazione possono essere installati prima del recuperatore di calore, nella condotta di ricircolo e/o a monte della bocchetta di immissione in ambiente.

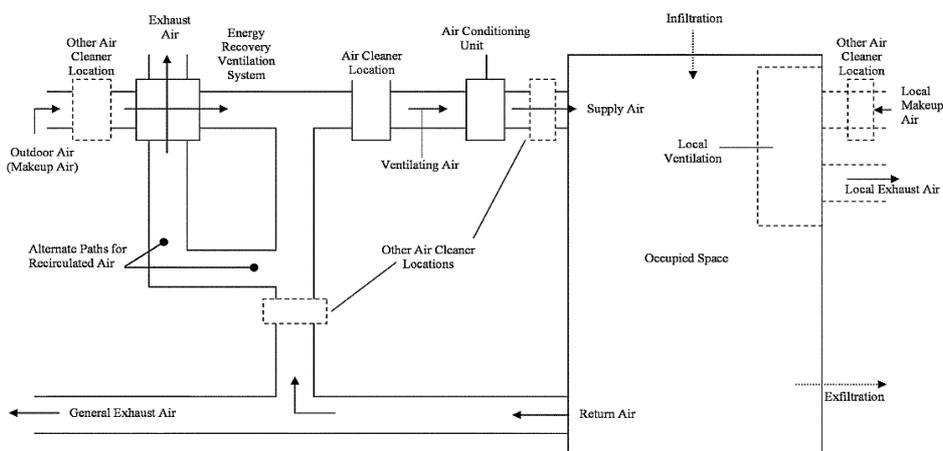


Figura 1.29. Possibili posizionamenti dei dispositivi di filtrazione [11]

A valle dei filtri per il particolato, possono essere installati, ove necessario, dei dispositivi a carboni attivi per l'abbattimento degli odori e di alcuni gas organici e inorganici contenuti nell'aria esterna, come VOC, NO₂, SO₂ e O₃. Quest'ultimo, in particolare, è responsabile dei seguenti fenomeni:

- irritazione agli occhi e problemi respiratori, soprattutto negli utenti che soffrono di allergie;
- reazioni di ossidazione in presenza di VOC, da cui possono scaturire sostanze ben più pericolose rispetto a quelle originarie.

Sempre secondo Ruan & Rim [48], anche in presenza di livelli molto alti di ozono, l'impiego di due filtri a carboni attivi non comporta vantaggi considerevoli rispetto all'azione di un unico dispositivo.

A differenza dei gas sopracitati, per il monossido di carbonio (CO) non esistono in commercio dei prodotti che garantiscano un'efficacia comprovata alle temperature tipiche dell'ambiente indoor. Perciò, nell'ipotesi in cui vi sia una fonte esterna di CO in prossimità dell'edificio, è necessario programmare il funzionamento del sistema di ventilazione al fine di minimizzarne l'ingresso. A tale proposito si suggeriscono due diverse strategie [49]:

- 1) se si conoscono gli orari in cui l'aria esterna diventa particolarmente inquinata, ad esempio a causa del traffico veicolare, è possibile modificare la regolazione dell'impianto affinché questo elabori il tasso di ricambio minimo in questi periodi;
- 2) se la concentrazione dei contaminanti gassosi è variabile nell'arco della giornata, si consiglia di installare un sensore esterno di CO fissando un set point di 5 ppm; se questo valore viene superato, come media in un intervallo di 5 minuti, l'impianto dovrebbe lavorare in modalità ricircolo per un periodo non inferiore a 20 minuti.

Indipendentemente dalla tecnologia impiegata, **per garantire un elevato rendimento di filtrazione** è necessario **evitare qualsiasi fenomeno di bypass** da parte dell'aria esterna, che, altrimenti, entrerebbe all'interno dell'edificio senza subire alcun trattamento. La polvere, inoltre, tenderebbe ad accumularsi sulle pareti degli scambiatori e sui ventilatori, riducendo nel primo caso la superficie di scambio e nel secondo la portata di aria elaborata dall'impianto, senza considerare i rischi associati alla possibile proliferazione di muffe e funghi.

Al fine di **ottimizzare il processo di filtrazione** si raccomandano le seguenti operazioni:

- predisporre almeno due stadi di filtrazione, uno posto a monte e l'altro a valle dell'unità di trattamento dell'aria;
- eliminare eventuali giochi tra i filtri e i componenti del sistema attraverso opportune guarnizioni. A tale proposito, è stato dimostrato [50] che aggiungendo uno strato di guarnizione in neoprene pari a 1/8 di pollice tra le superfici di accoppiamento verticali dei telai di un filtro MERV 13 si ha un incremento importante dell'efficienza, fino al 17% in più per particelle di 1 µm;
- assicurarsi dell'effettiva integrità dei filtri prima dell'installazione, per scongiurare una possibile inefficienza degli stessi. È poi necessario verificare che i materiali costituenti il telaio siano resistenti all'umidità;

- garantire un'adeguata ermeticità dell'involucro, così come di tutto l'impianto di ventilazione, sigillando tutte le superfici di contatto metalliche con mastici o appositi materiali non porosi;
- prestare attenzione al corretto posizionamento delle bocchette di aspirazione dell'aria esterna, privilegiando le zone al riparo dal vento e dalla pioggia;
- effettuare una manutenzione regolare dei filtri secondo le indicazioni del produttore e del manuale di gestione dell'impianto, munendosi, ove necessario, di un segnalatore di avvertimento per la sostituzione degli stessi.

Sebbene siano efficaci su un vasto range di inquinanti, i filtri non riescono a contrastare la diffusione di virus, funghi e batteri presenti nell'aria. Questo compito viene invece demandato all'azione di ionizzatori a plasma freddo (NTP) o di lampade a radiazione ultravioletta germicida (UVGI) che, interagendo con il vapor d'acqua, danno vita a reazioni di ossidazione fotocatalitica in grado di distruggere i suddetti microorganismi. Sono inoltre responsabili della decomposizione dei composti organici volatili, resi dunque inoffensivi, e della inibizione degli odori. Tali dispositivi di sanificazione possono essere installati dopo la sezione filtrante, preferibilmente all'interno dell'UTA o del case della macchina, per attenuare il rumore prodotto dagli stessi; in alternativa, si consiglia di posizionarli a monte del collettore di mandata, al fine di inviare aria ionizzata nei vari ambienti. Per ulteriori considerazioni relativi ai processi di sanificazione dell'aria si rimanda al paragrafo 1.4.7.

1.4.1.3.1) Scelta del filtro secondo normativa

Secondo il nuovo standard UNI EN ISO 16890 [51], entrato in vigore a partire dal 2017, la classificazione dei filtri avviene in base alla loro capacità di catturare polveri grossolane (*coarse*), PM10, PM2.5 e PM1. A queste quattro tipologie di particelle corrispondono altrettanti gruppi di filtrazione descritti in Tabella 1.7:

Tabella 1.7. *Classificazione dei filtri secondo UNI EN ISO 16890*

Classe	ePM1 $0.3 \leq x \leq 1$	ePM2.5 $0.3 \leq x \leq 2.5$	ePM10 $0.3 \leq x \leq 10$	Valore di riferimento	Δp finale [Pa]
ISO Coarse	-	-	< 50%	Arrestanza gravimetrica iniziale	200
ISO ePM10	-	-	≥ 50%	ePM10	300
ISO ePM2.5	-	≥ 50%	-	ePM2.5	300
ISO ePM1	≥ 50%	-	-	ePM1	300

Per far parte di una certa categoria, i filtri devono essere in grado di catturare almeno il 50% di particolato corrispondente alle dimensioni indicate; l'effettivo rendimento di filtrazione in funzione della particella considerata va poi specificato accanto al gruppo di appartenenza del dispositivo.

Si sottolinea come non sia possibile effettuare un confronto diretto tra le vecchie classi G, M ed F della UNI EN 779 [52] e i nuovi gruppi visti in precedenza, in quanto la UNI EN 779 contempla solo una parte dei dati di prestazione esaminati invece dalla UNI EN ISO 16890. Ne consegue che la scelta dei filtri dovrà avvenire secondo criteri diversi, di seguito elencati:

- 1) definire dei livelli di benchmark per la concentrazione interna di particolato; in alternativa, si faccia riferimento ai limiti di sicurezza imposti dall'OMS [53], che si attestano a 20 µg/m³ e 10 µg/m³ rispettivamente per PM10 e PM2.5;
- 2) determinare le concentrazioni massime di inquinanti all'esterno dell'edificio;
- 3) calcolare l'efficienza minima di filtrazione richiesta per raggiungere i valori di benchmark prefissati. Si consiglia comunque di installare filtri leggermente più performanti rispetto ai rendimenti ottenuti con la procedura appena illustrata.

Ciò nonostante, a solo titolo esemplificativo, viene proposto in Tabella 1.8 un confronto, desunto dalle schede tecniche di alcuni produttori, tra la classificazione introdotta dalla nuova UNI EN ISO 16890 rispetto a quelle delle preesistenti norme UNI EN 779 e ASHRAE 52.2.

Tabella 1.8. Schema indicativo della corrispondenza fra la classificazione UNI EN 779, UNI EN ISO 16890 e ASHRAE 52.2

UNI EN 779:2012	UNI EN ISO 16890:2017				ASHRAE 52.2:2012			
	ISO Coarse	ePM10	ePM2.5	ePM1	MERV	Efficienza di filtrazione [%] per:		
						0.3-1.0 µm	1.0-3.0 µm	3.0-10.0 µm
G1	40%	n/d	n/d	n/d	1	n/d	n/d	> 20%
					2	n/d	n/d	> 20%
G2	70%	n/d	n/d	n/d	3	n/d	n/d	> 20%
					4	n/d	n/d	> 20%
G3	80%	n/d	n/d	n/d	5	n/d	n/d	≥ 20%
					6	n/d	n/d	≥ 35%
G4	90%	n/d	n/d	n/d	7	n/d	n/d	≥ 50%
					8	n/d	≥ 20%	≥ 70%
M5	n/d	50-60%	n/d	n/d	9	n/d	≥ 35%	≥ 75%
					10	n/d	≥ 50%	≥ 80%
M6	n/d	60-85%	50-65%	n/d	11	≥ 20%	≥ 65%	≥ 85%
					12	≥ 35%	≥ 80%	≥ 90%
F7	n/d	85-90%	65-80%	50-65%	13	≥ 50%	≥ 85%	≥ 90%
F8	n/d	90-95%	80-95%	65-80%	14	≥ 75%	≥ 90%	≥ 95%
F9	n/d	95-99%	95-99%	80-99%	15	≥ 85%	≥ 90%	≥ 95%

Si ritiene che questo paragone tra gli standard esistenti possa rivelarsi utile nella scelta del dispositivo filtrante da installare, in funzione dei target di indoor air quality (IDA) richiesti dal committente e della qualità dell'aria esterna (ODA). A tale scopo, la nuova UNI EN 16798-3, rispetto alla vecchia UNI EN 13779 [54], introduce il parametro "supply air quality" (SUP), per differenziare la quota parte di inquinanti contenuti nell'aria immessa rispetto a quelli presenti nell'ambiente occupato. Infatti, tanto maggiori sono le emissioni di contaminanti associate ai materiali, alle attività interne e al metabolismo umano e tanto più pura dovrà essere l'aria introdotta nei locali condizionati.

Ad esempio, se si considera un edificio scolastico ubicato in città, l'obiettivo potrebbe essere quello di raggiungere un'alta qualità dell'aria interna partendo da un'aria esterna con elevate concentrazioni di polveri (ODA 3), attraverso l'iniezione di aria sufficientemente pura per compensare le emissioni dovute alle finiture scolastiche e al metabolismo degli studenti. Questo, secondo quanto riportato in Tabella 1.9, richiederebbe l'impiego di due stadi di filtrazione F7 + F9, che tradotti nell'attuale UNI EN ISO 16890 corrisponderebbero, ad esempio, a due sistemi ePM1, uno con efficienza compresa tra 50 e 65%, l'altro con efficienza tra 80 e 99%. In particolare, il filtro meno performante andrebbe installato a monte del ventilatore, in modo tale da ridurre le polveri dell'aria esterna in ingresso all'impianto HVAC. Così facendo, viene prolungata la vita utile del dispositivo a maggiore efficienza, che dovrà essere posizionato a valle del ventilatore, in una zona in cui il flusso sia il più possibile uniforme. Si raccomanda l'impiego di filtri a carboni attivi (GF* in Tabella 1.9), in combinazione a quelli per il particolato, nell'ipotesi in cui si voglia fornire aria di categoria SUP 1 o SUP 2 partendo da concentrazioni esterne di inquinanti gassosi (CO, NO_x, SO_x, VOC e O₃) molto elevate, ovvero da ODA 3 o ODA 2.

Tabella 1.9. Classi di filtrazione raccomandate in funzione dell'aria esterna (ODA) e dell'aria fornita (SUP)

Qualità dell'aria esterna (ODA)	Qualità dell'aria fornita (SUP)									
	Classificazione filtri secondo UNI EN 779					Classificazione filtri secondo UNI EN 16890 [%]				
	SUP 1	SUP 2	SUP 3	SUP 4	SUP 5	SUP 1	SUP 2	SUP 3	SUP 4	SUP 5
ODA 1	M5+F7	F7	F7	F7	-	50<ePM10<60 + 50<ePM1<65	50<ePM1<65	50<ePM1<65	50<ePM1<65	-
ODA 2	F7+GF*+F7	M5+F7	F7	F7	M5	50<ePM1<65 + GF*+ 50<ePM1<65	50<ePM10<60 +	50<ePM1<65	50<ePM1<65	50<ePM10<60
ODA 3	F7+GF*+F9	F7+GF*+F7	M6+F7	F7	F7	50<ePM1<65 + GF*+ 80<ePM1<99	50<ePM1<65 + GF*+	50<ePM2.5<65 +	50<ePM1<65	50<ePM1<65

Si consiglia, inoltre, di **proteggere i filtri da alti valori di umidità relativa**, che dovrebbe essere mantenuta costantemente al di sotto del 90%, eccetto che per brevi periodi con condizioni atmosferiche particolarmente sfavorevoli; ancora, per minimizzare il rischio di crescita microbica, è bene che in tutte le parti del sistema di ventilazione l'umidità relativa media non superi l'80% per tre giorni consecutivi. A tal fine possono essere utilizzate delle batterie di preriscaldamento o un recuperatore termico parziale da installare a monte dei filtri stessi.

Per quanto riguarda l'aria di ricircolo, l'aria estratta da un qualsiasi locale trattato e l'aria espulsa verso l'esterno, si suggerisce l'impiego di un filtro che abbia la stessa qualità dei dispositivi collocati nel flusso principale, allo scopo di impedire la contaminazione dei componenti dell'impianto. Ove ciò non fosse possibile, i filtri dovrebbero essere almeno di classe ePM10 50%. Ancora, nel caso di sistemi con recuperatori di calore entalpici, i filtri per l'aria estratta dovrebbero appartenere alla stessa classe dei filtri localizzati nel flusso principale di mandata o avere almeno un'efficienza corrispondente alla categoria ePM2.5 50%.

La **sostituzione del filtro dovrebbe avvenire in funzione della caduta di pressione finale** specificata dal costruttore. Ad esempio, secondo UNI CEN/TR 16798-4, i filtri più performanti corrispondenti alle classi F8 e F9 andrebbero cambiati una volta raggiunto un Δp di 300 Pa, come riportato in Tabella 1.10. Tuttavia, per motivi igienici, i filtri del primo stadio andrebbero sostituiti dopo 2000 ore di funzionamento o al massimo dopo un anno, mentre quelli del secondo o terzo stadio, così come i dispositivi dell'aria espulsa e di ricircolo, dopo 4000 ore di lavoro o al massimo dopo due anni. Si consiglia comunque un controllo dei filtri da effettuarsi all'inizio di ogni anno scolastico e con cadenza regolare (preferibilmente ogni tre mesi), valutandone l'eventuale sostituzione o pulizia possibilmente dopo il periodo dei pollini e delle spore.

In aggiunta a tali indicazioni, il Protocollo CasaClima School richiede l'installazione di un segnalatore di avvertimento della necessità di sostituire i filtri. Ciò vale anche nel caso in cui l'unità di ventilazione, così come definita dal Regolamento (UE) n. 1253/2014, comprenda già al suo interno un'unità filtro: in tali circostanze, il prodotto deve essere dotato di segnale visivo o di allarme nel sistema di controllo che si attiva se la caduta di pressione sul filtro supera la caduta di pressione finale massima ammissibile.

Tabella 1.10. Indicazioni riguardanti la sostituzione dei filtri

Classe/Stadio di filtrazione	Sostituzione del filtro in corrispondenza di:		Fattori che influiscono sulla sostituzione
	Perdita di carico finale raccomandata	Periodo di esercizio	
Solo 1 stage di filtrazione		massimo 1 anno	<ul style="list-style-type: none"> - stagione - pollini e spore - aree trafficate o inquinate
Primo stage di filtrazione		massimo 1 anno	
Secondo stage di filtrazione		2 anni	
G1 - G4	150 Pa		
M5 - F7	200 Pa		
F8 - F9	300 Pa		

In conformità alle Linee Guida per la Definizione di Protocolli Tecnici di Manutenzione Predittiva sugli Impianti di Climatizzazione [22], **si raccomandano delle ispezioni da effettuare a intervalli regolari**, durante le quali devono essere verificati e registrati separatamente per ciascun filtro i seguenti parametri:

- differenza di pressione a monte e a valle del filtro;
- tempo di esercizio;
- stato dei filtri (controllo delle perdite di materiale filtrante e della mancanza di tenuta del filtro);
- corrispondenza del valore di efficienza previsto da progetto.

Per ulteriori considerazioni si rimanda al suddetto documento.

1.4.1.4) Ventilatori

La scelta del ventilatore è di cruciale importanza per garantire un'elevata IAQ e una buona performance energetica dell'impianto; infatti, se da un lato **il ventilatore è responsabile di una quota importante del**

consumo totale dell'edificio, dall'altro **condiziona la strategia di controllo della portata d'aria immessa** nei vari ambienti. Per questo motivo, in Tabella 1.11 ne vengono esaminate le principali tipologie.

La **potenza massima interna specifica di ventilazione (SFP)** è un parametro rappresentativo delle **prestazioni dell'intero sistema** e come tale deve essere contemplato nella scelta della macchina e nella progettazione dei vari componenti. Il calcolo di tale coefficiente è trattato nella norma UNI EN 16798-3, mentre i valori massimi da non eccedere possono essere determinati utilizzando le equazioni presenti nel Regolamento (UE) n. 1253/2014. Tale provvedimento, inoltre, ha imposto che, a partire dal 1° gennaio 2016, tutte le unità di ventilazione immesse sul mercato, tranne le unità a doppio uso, debbano essere dotate di azionamento a velocità multiple o variatore di velocità. Questo consente di rispondere efficacemente alla richiesta di ventilazione di un edificio scolastico, mutevole nell'arco della giornata, dando luogo ad una riduzione dei costi energetici rispetto ad un funzionamento a portata costante. A tale scopo, possono essere implementate anche altre modalità di controllo della portata d'aria in funzione delle caratteristiche del ventilatore installato, come la variazione del passo delle pale in fase di esercizio dell'impianto.

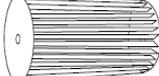
Ciò nonostante, l'utilizzo di una **macchina a velocità di rotazione variabile** è sicuramente il metodo più diffuso ed indicato; esso, in particolare, presume l'impiego di un inverter con cui poter modificare la frequenza di alimentazione e quindi il numero di giri di un motore ad induzione a corrente alternata. Questo permette al ventilatore di interfacciarsi con diversi sistemi di controllo, affinché l'impianto possa offrire elevati rendimenti anche in condizioni di off-design. In alternativa all'inverter, possono essere utilizzate le cosiddette tecnologie EC, ovvero motori in corrente continua a magneti permanenti con commutatore elettronico. Questi, rispetto ai primi, raggiungono efficienze elevate anche con piccole taglie.

Si consideri inoltre la possibilità di sovradimensionare alcune parti dell'impianto per ridurre le perdite di carico, favorendo la scelta di ventilatori più performanti che possano lavorare nell'intorno del punto a massima efficienza.

Infine, per garantire un buon bilanciamento dell'impianto, è necessario prestare attenzione al **posizionamento del ventilatore rispetto alla presenza di curve e restringimenti di sezione** che potrebbero creare turbolenza nel flusso, riducendo l'accuratezza di misura della portata. A tale proposito, la norma ANSI/ASHRAE Standard 111 suggerisce di mantenere una distanza di 3-8 diametri equivalenti tra la sezione di ingresso del ventilatore e un successivo cambio di direzione e di garantire una lunghezza del tubo di espulsione di almeno 2-6 diametri equivalenti [56].

L'analisi del funzionamento di un ventilatore implica degli approfondimenti relativi alla **rumorosità prodotta dallo stesso**, affrontata al paragrafo 1.4.5, e al controllo della portata, sia in immissione che in estrazione, esplorata nel paragrafo 1.4.4.

Tabella 1.11. Principali tipologie di ventilatori [35]

Tipologia		Efficienza [%]		Vantaggi	Svantaggi	Applicazioni
		Statica	Totale			
Assiale, senza pale a calettamento variabile		50-65	50-75	Compattezza e versatilità di installazione	Alta velocità periferica e rumore elevato	Basse pressioni di esercizio
Assiale, con pale a calettamento variabile		65-75	65-85	Flusso molto stabile	Come sopra, ma meno marcati	Basse pressioni di esercizio
Centrifugo a pale curve in avanti		45-60	45-70	Bassa velocità periferica, silenzioso e compatto	Possibilità di sovraccarico, bassa efficienza	Medie pressioni di esercizio
Centrifugo a pale dritte		45-55	45-70	Robusto, semplice, economico e facile da pulire	Bassa efficienza	Quando l'aria è carica di polveri
Centrifugo a pale curve all'indietro		65-75	65-85	Buona efficienza, nessun problema di sovraccarico	Alta velocità periferica e maggiore rumorosità	Medie e alte pressioni
Centrifugo a pale con profilo alare		80-85	80-90	Elevata efficienza, nessun problema di sovraccarico	Alta velocità periferica e maggiore rumorosità	Alte pressioni di esercizio
A elica		< 40	< 40	Basso costo e facilità di installazione	Efficienza bassa, non adatto ai sistemi canalizzati	Pressioni molto basse
A flusso misto		45-70	45-70	Minore velocità periferica e rumore rispetto agli assiali	Ingombri maggiori	Alte pressioni di esercizio
A flusso tangenziale		-	45-50	-	Bassa efficienza	Bassissime pressioni

1.4.1.5) Canali di distribuzione dell'aria

Il **design della rete di distribuzione dell'aria** deve essere tale da **minimizzare il consumo energetico e la generazione di rumore, limitando al contempo i costi d'investimento e salvaguardando lo spazio necessario alle operazioni di installazione, pulizia e manutenzione**. In particolare, per la ventilazione degli edifici scolastici, si raccomandano dei **sistemi a bassa pressione**, caratterizzati da **piccole perdite di carico e da velocità ridotte**, non superiori a 10 m/s. Si consiglia inoltre un layout impiantistico più semplice e simmetrico possibile, che promuova l'uniformità dei flussi lungo i canali. A tale proposito in edifici molto grandi, potrebbe convenire l'installazione di più sistemi VMC tra loro indipendenti, per sopperire alla necessità di alimentare locali separati da corridoi o atrii molto estesi. In questo modo, nonostante i costi d'investimento siano più elevati, è possibile contenere la lunghezza dei canali di distribuzione e con essi le perdite di carico, dando luogo ad una riduzione dei costi totali d'esercizio rispetto a quelli che si avrebbero con un unico impianto e facilitando le operazioni di bilanciamento durante la messa in servizio.

La rete di distribuzione dell'aria può rappresentare una via preferenziale per la diffusione del fumo e del fuoco in caso di incendio; per questo motivo, è d'obbligo il rispetto di tutti i requisiti di sicurezza e di protezione antincendio sanciti dai regolamenti di settore, come l'installazione delle serrande tagliafuoco. Queste, ad esempio, devono essere testate secondo le norme UNI EN 1366-2 [57] e UNI EN 13501-3 [58] e devono essere classificate secondo lo standard di prodotto UNI EN 15650 [59]. Ovviamente, anche le condotte stesse, così come i rispettivi sigillanti, guarnizioni e giunti flessibili, devono essere resistenti al fuoco, testati secondo UNI EN 1366-1 [60] o UNI EN 1363-1 [61] e classificate in conformità a UNI EN 13501-3. Inoltre, per la prevenzione alla diffusione del fumo lungo le condotte il riferimento è rappresentato da UNI EN 1366-8 [62]. Si presuppone che tali vincoli vengano rispettati in tutte le configurazioni impiantistiche e pertanto non verranno affrontati in tale trattazione.

Una progettazione dei canali di distribuzione volta a salvaguardare non solo la qualità dell'aria interna ma anche il benessere acustico degli occupanti e il consumo energetico dell'edificio, deve porre attenzione a tutti i seguenti aspetti:

- **ermeticità del sistema di distribuzione:** deve essere più elevata possibile, pertanto si consiglia di limitare i tratti rettilinei e di utilizzare pochi raccordi correttamente sigillati. In particolare, per condotte a bassa pressione, le perdite di aria L per m^2 di superficie non dovrebbero superare il valore dato dalla relazione sottostante:

$$L = 0,027 \cdot p^{0,65} \quad [l/s \cdot m^2]$$

dove p è la pressione di esercizio dell' i -esimo canale. In media, le perdite si attestano al 6% della portata volumetrica elaborata dall'impianto. I limiti di tenuta all'aria devono essere conformi alla UNI EN 12237 [63] per le condotte circolari e alla UNI EN 1507 [64] per quelle rettangolari.

- **ingombri:** si preferiscano canali a sezione circolare, caratterizzati da perdite di carico inferiori rispetto a quelli rettangolari, per i quali il rapporto tra lato lungo e lato corto deve essere più vicino possibile a 1 e non deve superare il valore 3:1. Si ricorda inoltre l'importanza di riservare uno spazio adeguato alle operazioni di accesso, pulizia e manutenzione delle condotte, così come all'installazione e all'esercizio delle serrande tagliafuoco;

- uniformità del flusso e riduzione delle perdite di carico:** sono i due obiettivi principali da perseguire nella progettazione di una rete aeraulica. A tale scopo, si raccomanda di limitare il numero e la tipologia di raccordi e di cambi di direzione, di posizionare gomiti o derivazioni di canali a distanza l'uno dall'altro di almeno 4-5 diametri del condotto, di preferire le giunzioni/diramazioni a Y rispetto a quelle a T (vedasi Figura 1.30) e di realizzare delle curve ad ampio raggio;

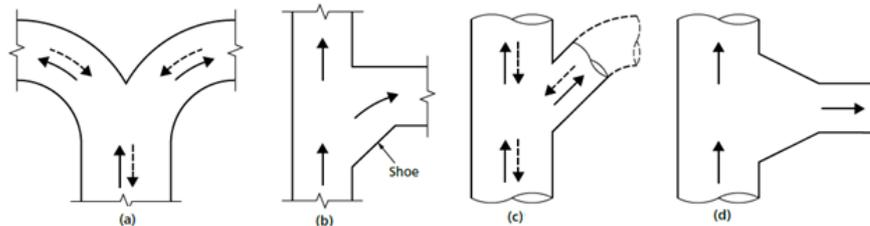


Figura 1.30. Esempi di un buon design: giunzioni per condotte rettangolari (a e b) e circolari (c e d) [35]

- materiali fonoassorbenti fibrosi:** se in passato erano spesso utilizzati per l'isolamento acustico interno dei canali, oggi **se ne sconsiglia fortemente l'uso**, in quanto rappresentano una **potenziale sorgente inquinante**, a causa del rilascio di fibre e di altre particelle nel flusso di aria fresca. Inoltre, possono contribuire alla ritenzione di umidità e alla conseguente crescita microbica.

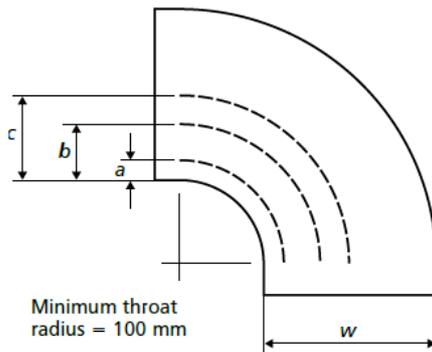
Relativamente agli aspetti acustici, è bene rimarcare come l'impatto acustico degli impianti di ventilazione possa essere mitigato mediante un accurato dimensionamento di tutti i componenti d'impianto, oltre alla scelta delle velocità di passaggio e di efflusso attraverso gli stessi. Queste, in conformità a CIBSE Guide A [65], non dovrebbero superare 6 m/s, 5.5 m/s e 3 m/s rispettivamente nelle condotte principali, nelle diramazioni secondarie e nei canali di immissione; il Protocollo CasaClima School, invece, suggerisce dei valori massimi ancora più cautelativi, pari a 5 m/s nel canale principale e 4 m/s nelle diramazioni principali, nell'ipotesi in cui l'impianto elabori una portata superiore a 100 m³/h.

È chiaro che, trattandosi di valori massimi, nulla vieta di adottare velocità più basse nei canali per ovvi motivi di rumorosità, dato che la pressione sonora è legata alla velocità mediante una relazione alla sesta potenza. Ad esempio, una riduzione del 12% di quest'ultima può dare un'attenuazione del livello di rumorosità di circa 4 dB.

I problemi maggiori vengono di solito riscontrati nel tratto di canale immediatamente a valle del ventilatore, a causa degli intensi **fenomeni di turbolenza**. Di seguito alcune raccomandazioni per ridurre al minimo questo problema:

- utilizzare un giunto antivibrante tra il ventilatore e il canale;
- predisporre, dopo il giunto, un tratto rettilineo di condotto di lunghezza non inferiore a 3 diametri;
- l'allargamento di sezione del canale dovrebbe prevedere un angolo massimo di inclinazione delle pareti di 15°. In alternativa, quando l'inclinazione del lato divergente supera i 22.5°, si consiglia di inserire all'interno dei setti divisori;

- se in prossimità della sezione di uscita del ventilatore fosse presente una curva con un angolo di curvatura maggiore di 45°, questa dovrebbe essere equipaggiata con i cosiddetti “splitters”, ovvero con delle alette defletttrici che rendono il flusso più uniforme, come rappresentato in Figura 1.31:



Dimension w / mm	Number of splitters	Splitter position		
		A	B	C
400–800	1	$w/3$	—	—
800–1600	2	$w/4$	$w/2$	—
1600–2000	3	$w/8$	$w/3$	$w/2$

Note: splitters not required for bend angles less than 45°

Figura 1.31. Curva a corto raggio con “splitters” e relativa posizione in funzione della dimensione del canale [35]

Si suggerisce di applicare le suddette indicazioni, con gli adattamenti del caso, anche al tratto di condotto a monte del ventilatore, affinché la velocità assiale del flusso sia più uniforme possibile con bassi livelli di turbolenza. In Figura 1.32 vengono mostrati alcuni esempi di connessioni corrette ed errate, a seconda che la macchina sia centrifuga (a sinistra) o assiale (a destra).

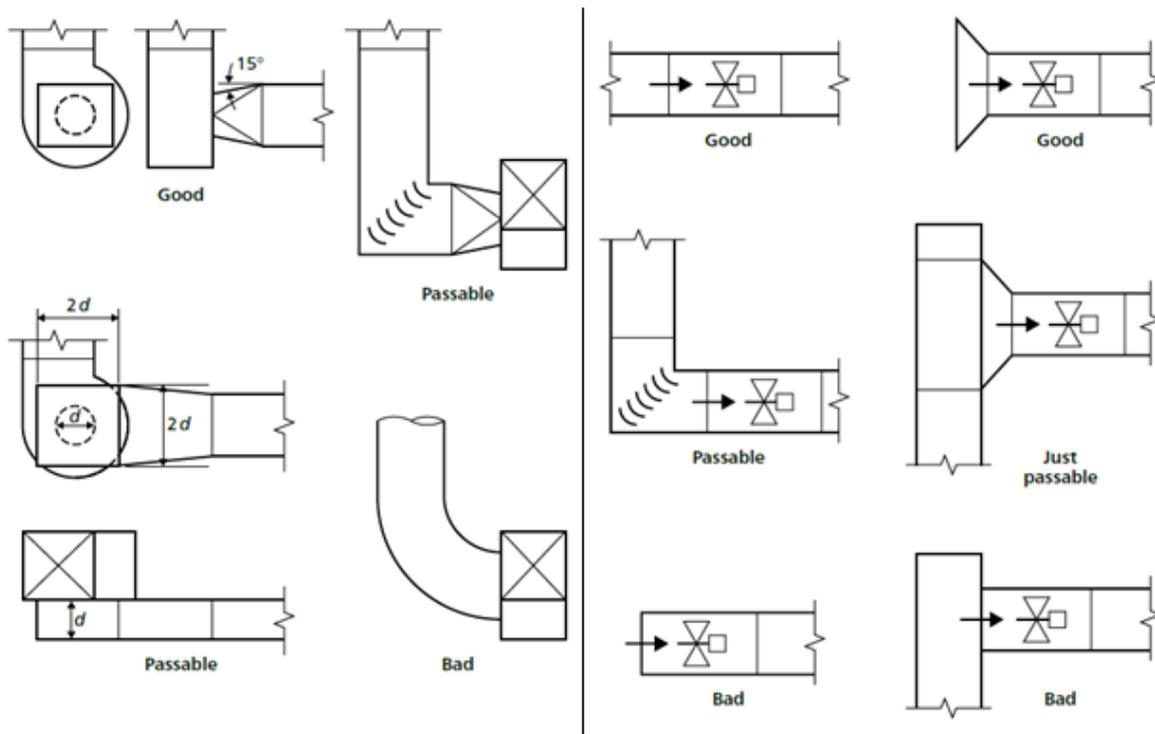


Figura 1.32. Esempi di connessioni corrette (good), discrete (passable) ed errate (bad) per ventilatori centrifughi (a sinistra) e assiali (a destra) [35]

Oltre alle cadute di pressione, le condotte di ventilazione sono interessate da scambi termici con l'ambiente circostante che possono manifestarsi sotto forma di perdite o guadagni di calore a seconda che l'impianto lavori in riscaldamento o in raffrescamento. Una relazione che permette di calcolarne il valore è la seguente:

$$\Delta t_{ad} = \frac{4U(t_{ad} - t_{as})l}{c \cdot \rho \cdot c_p \cdot d_h \cdot 10^3} \quad [K]$$

dove Δt_{ad} è la differenza di temperatura in [K] tra l'inizio e la fine di un tratto di tubo di lunghezza l in [m] e con trasmittanza totale U in [W/m²K], d_h è il diametro idraulico medio del tubo in [m], c è la velocità dell'aria nel tubo in [m/s], ρ e c_p sono, rispettivamente, la densità in [kg/m³] e il calore specifico a pressione costante dell'aria in [kJ/kg·K], t_{ad} è la temperatura dell'aria all'interno della condotta in [°C] e t_{as} è la temperatura dell'aria all'esterno della stessa in [°C].

In particolare, per non compromettere le prestazioni energetiche dell'impianto, è bene limitare la lunghezza delle condotte a valori inferiori a 10 m e assicurare uno spessore di isolamento adeguato in funzione dell'emissività della superficie esterna, della conducibilità termica dell'isolante e della temperatura dell'aria all'interno del tubo. Per un calcolo rigoroso degli spessori si rimanda alle norme di settore come la UNI EN ISO 12241 [66] oppure ai valori tabulati in CIBSE Guide A. In alternativa all'utilizzo delle tabelle o alla consultazione delle norme, è possibile calcolare lo spessore minimo di isolante l_n tale da evitare la formazione di condensa sulla superficie esterna del tubo come:

$$l_n = \frac{(t_{ds} - t_{ad})\lambda}{(t_{as} - t_{ds})h_{so}} \quad [m]$$

dove t_{ds} è la temperatura di rugiada dell'aria all'esterno della condotta in [°C], λ è la conducibilità termica dell'isolante in [W/m·K] e h_{so} è il coefficiente di scambio termico della superficie esterna del tubo in [W/m²K].

Normalmente, gli spessori calcolati come sopra risultano inferiori rispetto a quelli richiesti per l'isolamento termico. In circostanze particolari, ovvero quando le condotte contenenti aria fredda passano lungo una zona ad elevata temperatura e umidità relativa, può essere richiesto l'impiego di una barriera al vapore da applicare sulla superficie esterna dell'isolante.

La **manutenzione e la pulizia dei canali** è un aspetto di primaria importanza, soprattutto nell'ottica di prevenire la diffusione di virus e batteri negli ambienti occupati. Si rimanda ai paragrafi successivi per ulteriori approfondimenti.

1.4.1.6) Terminali di immissione ed estrazione

I terminali di immissione ed estrazione devono essere **dimensionati e posizionati con grande attenzione**, affinché siano garantiti di una buona distribuzione dell'aria e di un'elevata qualità ambientale interna, anche a livello acustico e termo-igrometrico.

Per facilità di comprensione, si riporta il significato dei termini più ricorrenti nei manuali dei costruttori e che verranno utilizzati anche in tale contesto:

- **lancio o gittata:** è la massima distanza che intercorre tra la sezione d'ingresso dell'aria e il punto in cui la velocità del getto raggiunge il valore terminale;
- **velocità di efflusso:** è la velocità di immissione in ambiente;
- **velocità terminale:** è la velocità dell'aria all'involuppo del getto;
- **velocità residua:** è la velocità dell'aria nella zona occupata;
- **Noise Ratings (NR):** è l'indice di valutazione del rumore secondo ISO;
- **caduta/risalita:** è la massima distanza che intercorre tra l'asse del getto e il punto più basso/alto dell'involuppo.

Importanti benefici dal punto di vista dell'efficienza di ventilazione possono essere conseguiti sfruttando il **fenomeno dell'induzione e dell'effetto camino**. Il primo consiste nel richiamo di aria interna dovuto all'ingresso della portata di rinnovo e ciò produce una maggiore miscelazione, riducendo il pericolo di correnti fredde o episodi di stratificazione di aria calda; il secondo, noto anche con il termine di effetto Coanda, si instaura in prossimità del soffitto a causa della depressione esistente tra lo stesso e il getto d'aria e si traduce in un aumento del lancio. Affinché si concretizzi tale situazione, il terminale deve essere installato ad una distanza massima di 20-30 cm dal soffitto, lontano da qualsiasi elemento di ostruzione al moto dell'aria.

Sebbene la procedura di dimensionamento esuli dallo scopo della presente trattazione, è importante ricordare come le dimensioni delle bocchette non possano prescindere dai parametri di input selezionati, come la gittata e la velocità limite nella zona occupata. In generale, si suggerisce di contenere le velocità di efflusso entro i valori massimi di Tabella 1.12, di mantenere un lancio pari a circa il 75% della lunghezza caratteristica del locale e di garantire che le velocità residue rispettino i valori di Tabella 1.13:

Tabella 1.12. *Velocità massime raccomandate attraverso i terminali di immissione ed estrazione*

Terminale	Velocità di efflusso [m/s]		
	Minima	Normale	Massima
Immissione	1.5	2.5	3
Estrazione	2	3	4

Si sottolinea come le suddette velocità massime raccomandate attraverso i terminali di immissione ed estrazione siano relative alla distribuzione dell'aria secondo il principio di miscelazione. Viceversa, nel caso in cui venga messa in pratica la ventilazione a dislocamento, le velocità di efflusso non dovrebbero superare 0.20 - 0.30 m/s, onde evitare fenomeni di discomfort dovuti alla presenza di correnti d'aria in corrispondenza delle caviglie.

Tabella 1.13. *Velocità residue raccomandate da UNI 10339 [6]*

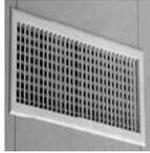
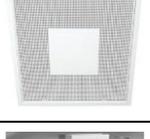
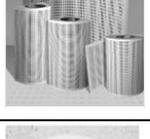
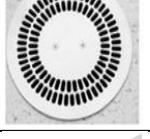
Categoria di edificio	Velocità residua [m/s]	
	Riscaldamento	Raffrescamento
Scuole materne ed elementari	≤ 0.10	≤ 0.10
Scuole medie e superiori	da 0.05 a 0.15	da 0.05 a 0.20
Locali non adibiti ad insegnamento	da 0.05 a 0.15	da 0.05 a 0.20

I valori di Tabella 1.13 possono essere ecceduti a seconda delle condizioni termo-igrometriche esistenti, dell'abbigliamento e dell'attività fisica dei presenti, ma dovrebbero comunque soddisfare i criteri per la valutazione del benessere secondo UNI EN ISO 7730 con PPD inferiori a 10%. Ad esempio, in estate, se la temperatura interna è superiore a 25°C, è possibile tollerare velocità residue anche superiori a 0.30 m/s, ma solo se l'insegnante o gli occupanti hanno il pieno controllo della ventilazione.

Si comprende, dunque, come **la corretta progettazione dei terminali sia fondamentale per assicurare un'efficace distribuzione dell'aria, preservando al contempo i parametri di comfort.**

Una prima classificazione prevede la distinzione dei dispositivi di immissione nelle tipologie di Tabella 1.14:

Tabella 1.14. Classificazione dei terminali di immissione in ambiente [68]

Tipologia terminale		Posizione	Caratteristiche
Bocchette e griglie		A parete o sui canali rettangolari in vista	Sono dotati di una doppia serie di alette mobili, con cui l'aria viene immessa sia in verticale che in orizzontale. Adatti al riscaldamento e al raffreddamento, per la mandata e per la ripresa
Diffusori VAV		A soffitto o a parete a seconda della configurazione	Adatti per impianti VAV a portata variabile dal 20% al 100% e per differenze di temperatura tra aria immessa e ambiente fino a -14°C. Possono essere ad alta o altissima induzione
Diffusore a flusso elicoidale		A soffitto o su canale in vista	Elevata induzione con lanci ridotti, basso gradiente di temperatura nella zona occupata. Adatti in impianti VAV con riduzione della portata fino al 25%
Diffusori a ugello orientabile		A parete o sui canali circolari in vista	Sono utilizzati per la diffusione dell'aria perimetrale in grandi ambienti, come le palestre coperte
Diffusori a schermo forellinato		A soffitto	Alta induzione che assicura un flusso d'aria uniforme con un differenziale di temperatura fino a -10 K. Adatti anche per la ripresa con possibilità di filtrazione dell'aria
Diffusori a dislocamento		A parete o a pavimento	Consentono l'esercizio della ventilazione a dislocamento, con basse velocità di effluo (0.2-0.4 m/s) e piccole differenze di temperatura, non superiori a 6-7 °C
Diffusore a pavimento		A pavimento, soprattutto per il raffreddamento degli ambienti	Richiedono che la temperatura di immissione sia prossima a quella ambiente e che il lancio verticale oltrepassi la zona occupata con elevata induzione ma senza creare discomfort
Diffusori lineari a feritoie		A parete o a soffitto a seconda della configurazione	Diffusione dell'aria uniforme anche in impianti VAV. Possono lavorare con gradi differenze di temperatura e sono adatti sia per l'immissione che per l'estrazione
Diffusori circolari		Su controsoffitto o su canali a vista	Regolazione del flusso d'aria in direzione orizzontale in regime di raffreddamento oppure verticale in regime di riscaldamento
Diffusori quadrati		Su controsoffitto	Molteplici direzioni di mandata, elevata capacità di ventilazione grazie all'alto rapporto di induzione

La portata complessiva da immettere in un determinato ambiente deve essere frazionata su più terminali affinché la portata elaborata da ognuno non comprometta le prestazioni acustiche dell'impianto e non dia luogo a correnti d'aria fastidiose. Allo stesso modo, è necessario evitare la formazione di zone di ristagno in cui la velocità dell'aria scenda sotto 8 cm/s. Da qui l'importanza di un **corretto posizionamento delle bocchette di mandata**, che tenga anche conto dell'interazione tra di esse. Ad esempio, in ambienti molto ampi, come aule computer o auditorium, questo aspetto diventa di primaria importanza: al fine di minimizzare il numero di punti in cui i getti vengono a contatto, si suggerisce di utilizzare dei terminali a soffitto che immettano aria da tutti e quattro i lati e che siano collocati in modo sfalsato. Questa configurazione (Figura 1.33 a destra), infatti, sebbene richieda un terminale in più rispetto alla disposizione simmetrica (Figura 1.33 a sinistra), riduce i fenomeni di caduta del getto e il discomfort ad essi associato.

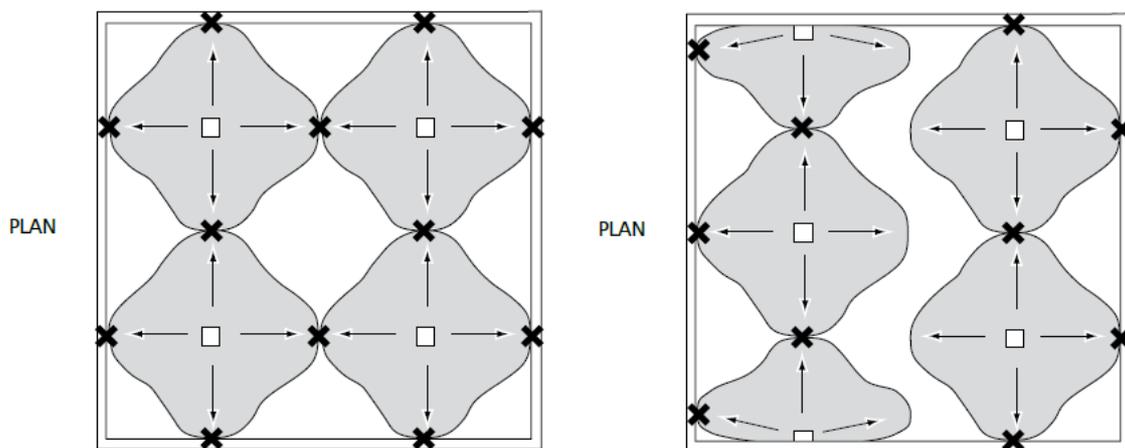


Figura 1.33. *Disposizione simmetrica (a sinistra) e sfalsata (a destra) delle bocchette di immissione [35]*

Questi criteri valgono anche per i locali di dimensione inferiore, come appunto le aule scolastiche. Qui il posizionamento delle bocchette deve interfacciarsi con la disposizione degli studenti, affinché questi non vengano interessati dalle correnti associate all'interazione dei getti; in ogni caso, è importante che in corrispondenza dei punti di contatto la velocità terminale sia inferiore a 0.25 m/s. Le configurazioni da evitare o a cui porre particolare attenzione sono quelle a getti opposti o a getti in serie, rappresentate in Figura 1.34:

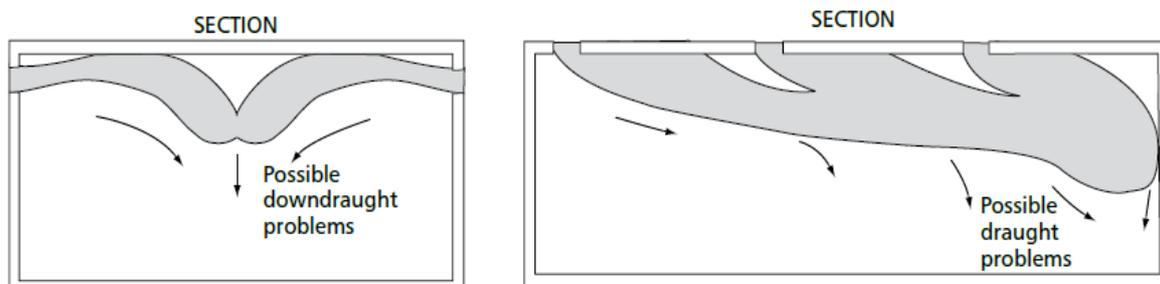


Figura 1.34. *Posizionamento delle bocchette di immissione con possibilità di correnti d'aria fastidiose [35]*

L'interazione tra i flussi si manifesta anche a livello acustico: i rumori relativi a due o più terminali non si sommano in modo aritmetico, ma si amplificano l'un l'altro a seconda della differenza tra i livelli sonori emessi. Un ulteriore elemento di disturbo è rappresentato dal "fattore di direzionalità", ovvero dalla presenza di ostacoli che possono riflettere le onde sonore aumentando l'intensità del rumore percepito. Di conseguenza, è sempre opportuno evitare di installare bocchette, griglie e macchine in prossimità degli angoli o di altre superfici riflettenti.

I **terminali di estrazione** consistono in griglie o bocchette di ripresa, la cui disposizione deve rispecchiare la strategia di ventilazione che si intende mettere in pratica, ma senza interferire con la gittata dei diffusori di immissione. In caso contrario, infatti, si avrebbe la **corto-circuitazione dell'aria fresca** e quindi un'efficienza di ventilazione prossima a zero. L'installazione, a seconda della configurazione, può avvenire a parete, a soffitto oppure su canali in vista. Ancora, per quanto concerne il posizionamento, si preferiscano zone stagnanti prossime ad una fonte di calore o ad una superficie fredda al fine di incrementarne la temperatura, riducendo quindi le perdite di calore e il rischio di corrente fredde discendenti. Si evitino invece le zone adiacenti a finestre o ad aperture verso l'esterno.

Per quanto riguarda le griglie di transito da posizionare sulle porte, è opportuno che la caduta di pressione attraverso di esse non superi i 10-20 Pa, onde evitare l'insorgere di problemi di natura pratica associata all'apertura manuale delle porte stesse.

Anche le griglie di estrazione influiscono sulla qualità ambientale interna, sia in termini di correnti d'aria che di impatto acustico. Per questo motivo, in Tabella 1.15 vengono proposte alcune velocità raccomandate sui terminali di estrazione in funzione della posizione degli stessi:

Tabella 1.15. Velocità raccomandate in corrispondenza dei terminali di estrazione

Posizione delle griglie	Velocità [m/s]
Al di sopra delle zone occupate	2.5
Entro le zone occupate, lontano dai posti a sedere	1.5 - 2.0
Entro le zone occupate, vicino ai posti a sedere	1.2 - 1.5
Griglia a parete o su porte	0.8 - 1.1

Inoltre, si raccomanda di rispettare una velocità massima di 0.30 m/s in corrispondenza della superficie luogo dei punti distanti 0.60 m dal perimetro della griglia.

In conclusione, la scelta del terminale da installare è dettata da molteplici fattori, come la rumorosità, il lancio, la perdita di carico e il rapporto d'induzione; inoltre, è vincolata alla tipologia di impianto presente nell'edificio e alle caratteristiche architettoniche dei vari ambienti. Ad esempio, nelle ristrutturazioni o in edifici privi di controsoffitto, la soluzione più comune prevede l'installazione di terminali sulle pareti interne che dividono il locale condizionato dall'ambiente adiacente, come un corridoio, dove corrono solitamente i canali. La ripresa dell'aria viene effettuata mediante griglie di estrazione a parete, o con griglie di transito verso il corridoio. Al fine di evitare cadute di aria fredda, si consiglia l'impiego di diffusori lineari a parete ad alta induzione, adatti a lavorare con impianti a portata variabile e con temperature di mandata inferiori rispetto a quella interna. Nelle nuove costruzioni, invece, la scelta dei terminali gode di

una maggiore “libertà”, in quanto deve declinarsi alla strategia di ventilazione messa in pratica. In linea generale, però, una buona pratica è quella di collocare le bocchette di immissione e di estrazione sui lati opposti dell’ambiente, il più lontane possibile proprio per evitare cortocircuiti [15]. Infine, non è assolutamente da trascurare la manutenzione dei terminali, la quale può incidere sia sulle perdite di carico che sull’IAQ raggiunta in ambiente. A tale proposito si suggerisce di effettuarne la pulizia almeno una volta l’anno.

1.4.2) Strategie di distribuzione dell’aria

Nel corso degli anni si è consolidato il concetto secondo cui l’aria immessa dal sistema di ventilazione meccanica, essendo il più delle volte a temperatura inferiore rispetto a quella interna, non dovesse creare discomfort termico agli occupanti. Per questo motivo, si era soliti posizionare i terminali ben al di sopra della zona occupata e in prossimità del soffitto, per sfruttare l’effetto Coanda; inoltre, le velocità di immissione dovevano essere sufficientemente elevate per incentivare la miscelazione dell’aria, creando un ambiente termico uniforme.

Solo di recente ci si è interrogati sull’efficacia di un tale posizionamento sulla capacità di apprendimento degli studenti e sull’IAQ complessiva, soprattutto alla luce della situazione emergenziale indotta dalla diffusione del Covid-19. Per rispondere a tale quesito, si ritiene opportuno investigare i **pregi e i difetti delle principali strategie di distribuzione dell’aria**, sottolineandone le **possibili implementazioni all’interno degli edifici scolastici** [69]. I parametri utilizzati per valutarne le prestazioni includono l’efficienza di ventilazione e l’efficienza di ricambio dell’aria:

- **l’efficienza di ventilazione ε** descrive quanto efficacemente il sistema sia in grado di rimuovere/diluire i contaminanti interni. L’equazione che ne permette il calcolo è la seguente:

$$\varepsilon = \frac{C_R - C_O}{C_{OC} - C_O}$$

dove C_R , C_O e C_{OC} sono rispettivamente la concentrazione di inquinanti nel flusso di estrazione, nel flusso di immissione e all’interno della zona occupata. Il parametro ε dipende quindi dal sistema di distribuzione dell’aria e dalla posizione delle sorgenti inquinanti. In presenza di completa miscelazione di aria e contaminanti, l’efficienza di ventilazione è pari a 1.

- **l’efficienza di ricambio dell’aria ε^a** esprime la velocità con cui l’aria viene rinnovata all’interno di un ambiente. È quindi una misura del tempo medio richiesto $\bar{\tau}_r$ per far sì che il volume di aria della stanza venga ricambiato rispetto al più breve periodo di ricambio teorico possibile τ_n ed è calcolabile come:

$$\varepsilon^a = \tau_n / \bar{\tau}_r \cdot 100\%$$

ε^a dipende dalla strategia di distribuzione dell’aria, dalla geometria della stanza e dalla posizione dei carichi inquinanti.

Indipendentemente dal sistema scelto, è necessario che **l’aria si diffonda uniformemente nell’intero ambiente, in modo da poterne effettuare un completo lavaggio**. Inoltre, la disposizione dei terminali di immissione ed estrazione deve essere tale da:

- neutralizzare i carichi termici presenti nel locale;
- mantenere i gradienti di temperatura entro i valori prescritti da normativa sia sul piano verticale che su quello orizzontale;
- sviluppare moti uniformi, contenendo la velocità residua entro i valori limite già analizzati;
- evitare le correnti d'aria fredde, i fenomeni di cortocircuito, la formazione di zone stagnanti e di stratificazione;
- raccogliere il pulviscolo in sospensione e trasportarlo verso gli elementi di ripresa.

I sistemi di distribuzione dell'aria più diffusi negli edifici scolastici prevedono l'immissione della portata di rinnovo secondo il **principio di miscelazione o di dislocamento**. Ciò nonostante, queste strategie performano bene solo all'interno di un certo range di funzionamento: ad esempio, con elevati ricambi d'aria e con basse temperature di mandata, è probabile che si manifestino correnti d'aria fredde [70]. In tali circostanze, una valida alternativa alle suddette configurazioni è rappresentata dai **soffitti diffusi**, i quali, come già anticipato, possono essere applicati sia ai sistemi di ventilazione naturale sia a quelli meccanici e permettono di ridurre in modo sostanziale i fenomeni di discomfort termico.

Si intuisce quindi l'esigenza di fornire una panoramica delle numerose strategie di ventilazione ad oggi implementabili negli edifici scolastici.

1.4.2.1) Ventilazione a miscelazione (MV, *mixing ventilation*)

Nella **ventilazione a miscelazione l'aria di mandata viene immessa a velocità sostenuta lungo il soffitto**, in modo da indurre, nella zona occupata, dei moti turbolenti secondari e strettamente influenzati da correnti convettive naturali associate a sorgenti interne e carichi perimetrali. Ne deriva una distribuzione uniforme degli inquinanti all'interno dello spazio, affinché questi possano essere estratti da un'apposita apertura posta solitamente nella parte alta del locale.

I terminali di immissione possono essere bocchette a parete o diffusori a soffitto. Si raccomanda comunque l'utilizzo di dispositivi ad alta induzione, come i diffusori lineari o a flusso elicoidale.

La miscelazione, caratterizzata da un'efficienza massima di ventilazione unitaria, è utilizzata soprattutto con sistemi di raffrescamento ad aria; viceversa, non è indicata per il riscaldamento degli ambienti, in quanto può dar luogo a stratificazione termica. Una soluzione in grado di mitigare questo problema consiste nella combinazione tra diffusori a soffitto posti al centro del locale e diffusori lineari a feritoia regolabili e collocati lungo le pareti perimetrali. In questo modo, mentre i diffusori a geometria fissa soddisfano i requisiti e gli standard minimi di efficienza energetica, l'utilizzo dei diffusori lineari perimetrali permette un efficace controllo del comfort e dell'IAQ. Una recente evoluzione tecnologica a questo tipo di strategia è stata apportata dall'introduzione sul mercato delle travi fredde, unità terminali ibride di diffusione/movimentazione dell'aria dotate di batteria di scambio termico. Esse consentono di suddividere già in sede progettuale i carichi sensibili e latenti: i primi vengono neutralizzati dall'aria secondaria indotta nell'ambiente, mentre i secondi vengono compensati dall'aria primaria immessa dalla trave attraverso dei terminali lineari ad ugelli.

1.4.2.2) Ventilazione a dislocamento (DV, displacement ventilation)

La **ventilazione a dislocamento**, rappresentata schematicamente in Figura 1.35, consiste **nell'immissione di aria nella parte inferiore dell'ambiente**, la quale, attraverso flussi convettivi indotti dai carichi interni, trascina con sé gli inquinanti verso la sezione superiore del locale, da cui poi verranno estratti. Il gradiente di temperatura verticale che ne deriva assume un andamento lineare tra il pavimento e l'altezza dello strato in cui si hanno i fenomeni di rimescolamento, mentre al di sopra di esso la temperatura dell'aria rimane pressoché costante. I diffusori a dislocamento possono essere posizionati in corrispondenza degli angoli inferiori delle stanze, oppure integrati all'interno del pavimento e/o delle pareti laterali inferiori.

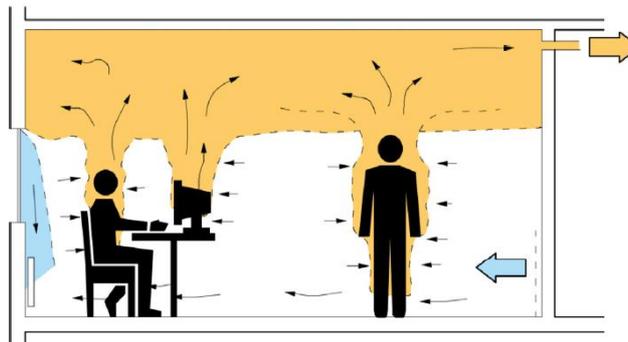


Figura 1.35. Ventilazione a dislocamento [69]

Il grande vantaggio di questa strategia consiste nell'elevata efficienza di ventilazione, i cui valori massimi possono essere anche superiori all'unità. A parità di portata di rinnovo, il dislocamento garantisce maggiori livelli di IEQ rispetto alla miscelazione, in virtù dei seguenti motivi: capacità di stratificazione dell'aria contaminata, bassa velocità di immissione e ridotta rumorosità. A tale proposito, la gran parte dei diffusori a dislocamento presenta un indice di rumore inferiore a 25 NC (*Noise Criterion*) in corrispondenza della massima portata [71].

Si consiglia di immettere aria ad una temperatura inferiore di 2-3 K rispetto a quella interna, misurata ad un'altezza di 1.1 m e ad una velocità non superiore a 0.15 m/s. Di conseguenza, la ventilazione a dislocamento è adatta a climi temperati o freddi, con lunghi periodi in cui possa essere esercitato il free cooling. Ciò comporta un potenziale di risparmio energetico maggiore rispetto alle altre soluzioni, con valori prossimi al 20%. Naturalmente, i bassi differenziali di temperatura e le basse velocità di immissione, se da un lato tutelano il comfort degli occupanti, dall'altro limitano il potenziale di condizionamento del sistema, impedendo l'uso indipendente dello stesso. Infatti, la strategia a dislocamento è particolarmente indicata in presenza di componenti idronici, sia per il riscaldamento (termosifoni e impianti radianti a pavimento) che per il raffrescamento (travi fredde passive), mentre non è raccomandata in impianti a tutta aria o in edifici con altezze interpiano inferiori a 2.3 m [72].

1.4.2.3) Ventilazione diffusa dal soffitto (DCV, diffuse ceiling ventilation)

Come già evidenziato nei capitoli relativi all'areazione naturale, i **soffitti diffusi** rappresentano una soluzione molto vantaggiosa in edifici caratterizzati da elevati carichi termici e da un ricambio d'aria molto sostenuto, come le scuole. I punti di forza di queste soluzioni consistono nella quasi totale **assenza di**

correnti fredde, anche con temperature di immissione molto basse e nella riduzione della lunghezza delle condotte, in quanto lo spazio sovrastante il soffitto si comporta a tutti gli effetti come un plenum e non necessita dunque di terminali dedicati. Ne deriva che l'efficienza di ventilazione sia comparabile con i valori tipici della strategia a miscelazione e raggiunga valori compresi tra 0.9 e 1. Questo significa che i soffitti diffusi sono in grado di generare una buona miscelazione nella zona occupata attraverso un flusso convettivo, facendo sì che anche l'efficienza di ricambio d'aria sia particolarmente elevata. Ulteriori vantaggi sono riscontrabili nei modesti costi d'investimento, nei bassi consumi energetici e nel ridotto impatto acustico [73]. Ancora, i soffitti diffusi godono di un importante potenziale di raffrescamento radiante, grazie alla loro grande superficie di immissione e alle basse temperature superficiali.

L'immissione dell'aria in ambiente può avvenire in tre modalità diverse, come rappresentato in Figura 1.36 [74]:

- i pannelli sono impermeabili all'aria, la quale passa solamente attraverso gli spazi presenti tra le lastre;
- i pannelli sono permeabili all'aria, che è dunque in grado di raggiungere la zona occupata penetrando i pannelli stessi e percorrendo le fenditure di connessione tra una lastra e l'altra, con un minor rischio di discomfort termico;
- i pannelli sono costituiti da materiali porosi che, a causa delle maggiori perdite di carico, danno luogo ad una distribuzione di aria uniforme lungo tutta la superficie del soffitto, minimizzando, se non annullando, i problemi di discomfort termico. L'unico problema consiste in un incremento della potenza elettrica assorbita dal ventilatore.

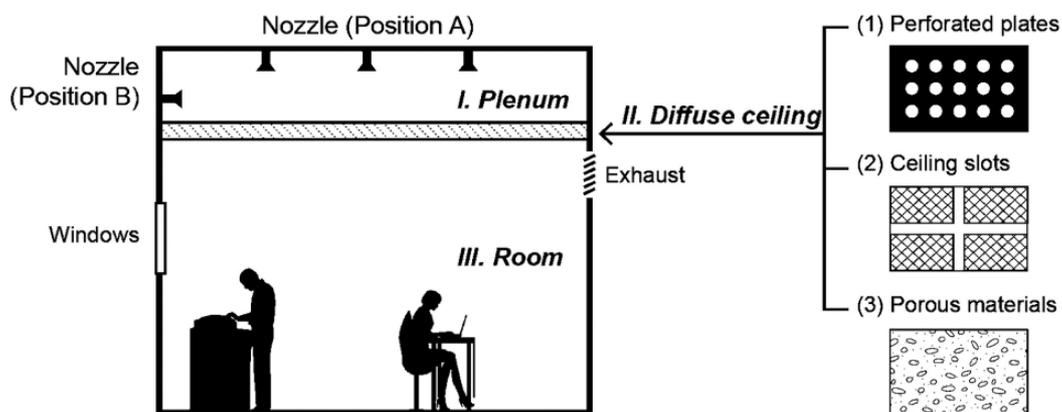


Figura 1.36. Possibili configurazioni di ventilazione diffusa a soffitto [74]

Nello studio condotto da C. Zhang *et al.* [70] sono state confrontate diverse configurazioni di soffitti diffusi applicate alle scuole ed è emerso come un'area di immissione pari al 18% della superficie del soffitto rappresenti la soluzione migliore per gestire elevati carichi interni, preservando al contempo il comfort termico degli occupanti. Un ulteriore vantaggio consiste nella riduzione della potenza elettrica specifica del ventilatore, in virtù delle basse perdite di carico, il cui andamento è rappresentato in Figura 1.37:

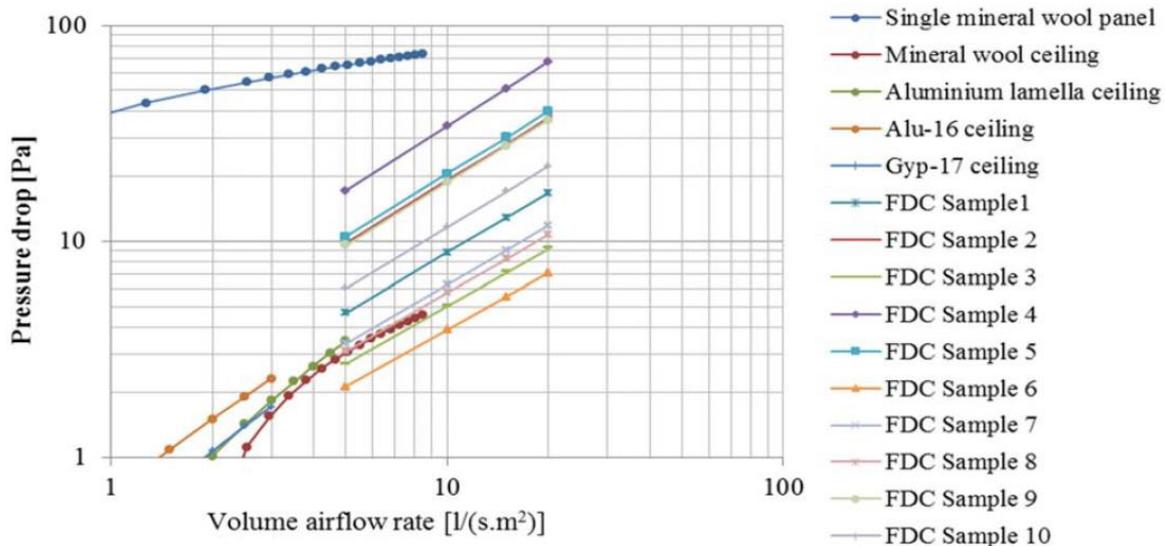


Figura 1.37. Perdite di carico per diverse tipologie di soffitti diffusi [70]

In particolare, le cadute di pressione variano in modo pressoché lineare al variare della portata di aria fresca, con delle differenze più o meno importanti a seconda del materiale considerato. Ad esempio, un soffitto composto da pannelli in lana minerale o in alluminio è caratterizzato da perdite di carico inferiori a 5 Pa passando da 1 a 10 L/s·m². Viceversa, si evidenziano cadute di pressione maggiori per configurazioni che prevedono l'impiego di un unico pannello in materiale poroso, indicate in Figura 1.37 con l'acronimo *FDC Sample*, fino a 70 Pa in corrispondenza di 20 L/s·m². La grande forbice è dovuta ai differenti spessori e alla differente tipologia di materiale, così come al rivestimento e alle vernici utilizzate. Ancora, la bassa performance del singolo pannello in lana minerale è dovuta alla grande resistenza offerta dal materiale al passaggio dell'aria e alla mancanza di fenditure di connessione tra un pannello e l'altro.

Anche la geometria della stanza influenza l'efficienza complessiva del sistema a diffusione: è stato osservato come, all'aumentare dell'altezza interpiano, diminuisca la capacità di raffrescamento estivo e cresca il rischio di correnti fredde a causa della maggiore intensità con cui si manifestano i fenomeni di galleggiamento, soprattutto in presenza di radiatori a parete; viceversa, si evidenziano piccoli gradienti di temperatura, sia verticali che orizzontali, in tutte le condizioni di esercizio, a dimostrazione della buona miscelazione conseguibile in ambiente. A dimostrazione di ciò, lo studio condotto da Hviid *et al.* [75] ha evidenziato come la differenza di temperatura media tra collo e caviglie sia di circa 0.5 K e quindi di gran lunga inferiore rispetto al limite di 3 K fissato dalla UNI EN ISO 7730 per gli ambienti appartenenti alla categoria B. Nello specifico, i gradienti verticali di temperatura vanno da 0.3 a 1 K/m in regime di raffrescamento e fino a 2 K/m in regime di riscaldamento e quindi sempre inferiori ai valori raccomandati dalla suddetta norma.

In generale, **i soffitti diffusi sono adatti a lavorare nei climi freddi**, nei quali può essere sfruttato l'effetto di free cooling; altrimenti, possono essere accoppiati con sistemi TABS (*thermally activated building system*) per fornire raffrescamento, riscaldamento e ventilazione lungo tutto l'arco dell'anno, con un risparmio di energia primaria dell'ordine del 50% rispetto ai sistemi di condizionamento convenzionali

[76]. Dal punto di vista tecnico, si raccomanda di mantenere una distanza minima di almeno 25 cm tra i pannelli e l'ambiente occupato e di realizzare un plenum di spessore non inferiore a 20 cm. Per una buona riuscita dell'impianto, è bene che l'altezza interpiano non superi i 3 m: in questo modo viene scongiurato il rischio di correnti fredde anche con ricambi orari elevati, prossimi a 10 h^{-1} , e con carichi interni di $140\text{-}154 \text{ W/m}^2$. Bisogna inoltre evitare che la temperatura superficiale scenda eccessivamente al fine di evitare fenomeni di condensazione sui pannelli, soprattutto se caratterizzati da alta conduttività. Si consigliano pertanto pannelli in lana di legno e cemento.

1.4.2.4) Distribuzione dell'aria a pavimento (UFAD, *under floor air distribution*)

Viene sfruttata la **presenza di un plenum sottostante il pavimento, ricavato tra il solaio e uno strato rialzato**, come rappresentato in Figura 1.38. Da qui l'aria viene immessa nello spazio occupato ad una temperatura non inferiore a $16\text{-}18 \text{ }^\circ\text{C}$, attraverso dei fan coil e/o diffusori integrati, che all'occorrenza possono essere controllati dagli utenti. Ciò conferisce alla strategia UFAD una maggiore flessibilità rispetto ai sistemi MV e un'elevata efficienza di ventilazione grazie ai fenomeni di galleggiamento che si instaurano in tali configurazioni. Ulteriori vantaggi consistono nella ridotta potenza assorbita dal ventilatore per distribuire l'aria all'interno del plenum e nelle alte temperature di immissione. Analogamente alla DV, anche in questo caso bisogna porre attenzione al posizionamento relativo tra terminali e occupanti, affinché essi non vengano esposti a correnti d'aria fastidiose a livello delle caviglie.

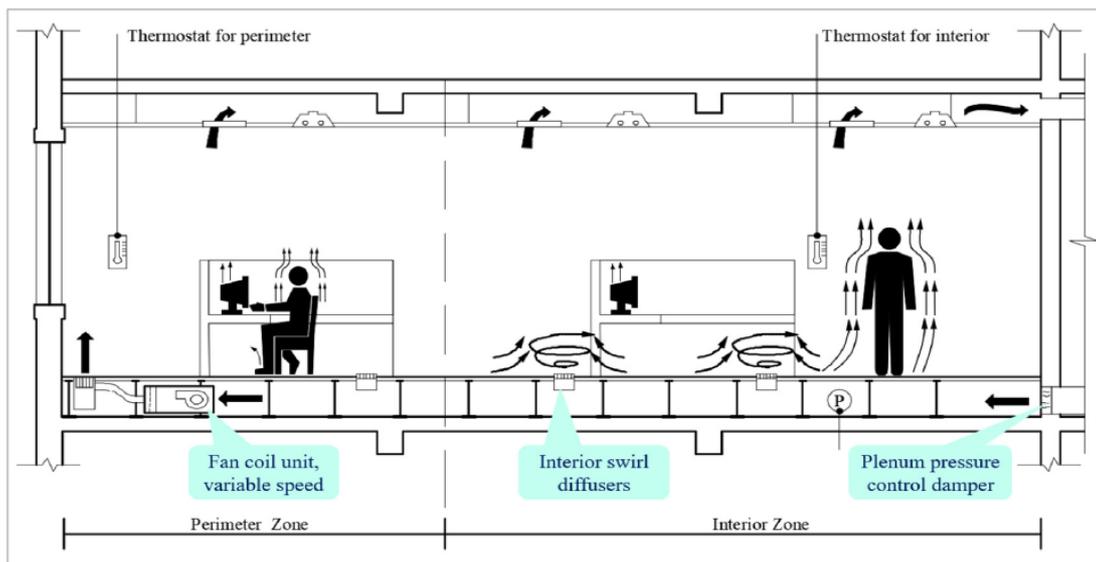


Figura 1.38. Sistema di distribuzione dell'aria a pavimento [69]

Il plenum deve essere mantenuto in sovrappressione rispetto all'ambiente condizionato di circa $10\text{-}25 \text{ Pa}$; inoltre, si consiglia di immettere l'aria dalle zone perimetrali, cosicché l'incremento di temperatura subita dall'aria al di sotto del pavimento venga contenuta il più possibile. Lo spessore del plenum può variare tra 0.25 e 0.5 m .

I sistemi UFAD non sono adatti ad ambienti come laboratori, cucine e bagni, nei quali alcune sostanze potrebbero cadere sul pavimento e compromettere il funzionamento dei diffusori.

1.4.2.5) Ventilazione di strato (SV, *stratum ventilation*)

La **ventilazione di strato** è caratterizzata dall'immissione di aria direttamente nella zona di respirazione: ne deriva un'elevata efficienza di ventilazione, una buona qualità dell'aria e un ambiente termicamente confortevole con piccoli gradienti di temperatura lungo il corpo. Questa strategia utilizza l'effetto di raffreddamento dato sia dalla temperatura che dalla velocità dell'aria di mandata. Ciò fa sì che, dato un certo carico termico, la portata possa essere ridotta e con sé anche la taglia del sistema, con minori costi d'investimento e di esercizio. Si consiglia l'impiego di diffusori circolari, in quanto performano bene sia in termini di comfort termico che di IAQ [77].

Sebbene poco diffusa, la **ventilazione di strato può rappresentare una valida alternativa ai sistemi di distribuzione convenzionali anche negli edifici scolastici, soprattutto nei climi caldi**. Affinché sia efficace, la velocità residua deve essere sufficientemente sostenuta, fino a 0.80 m/s. La bocchetta di ripresa è solitamente posizionata sul lato opposto a quello d'ingresso, ma è contemplata anche la soluzione con ingresso ed uscita sullo stesso lato, come rappresentato in Figura 1.39.

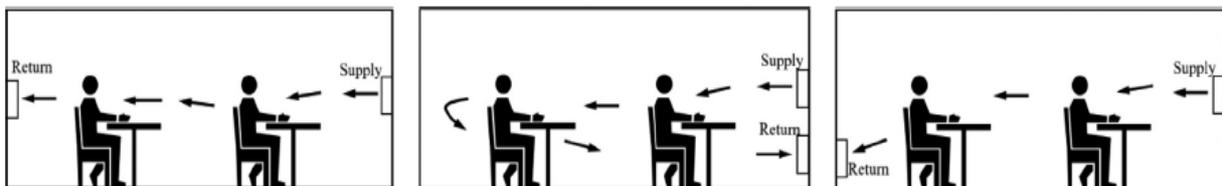


Figura 1.39. Diverse strategie di ventilazione di strato [69]

Si sottolinea come la SV sia stata finora concepita solo in ottica di raffrescamento, sebbene esista anche un importante potenziale di risparmio energetico nella stagione di riscaldamento.

1.4.2.6) Ventilazione a getto d'urto (IJV, *impinge jet ventilation*)

Nella **ventilazione a getto d'urto**, il dispositivo di immissione consiste nella condotta stessa, che rilascia l'aria fresca ad una certa altezza dal pavimento, mentre l'estrazione avviene al di sotto del soffitto, come mostrato in Figura 1.40 (a). Caratterizzata da differenti regimi di flusso, la strategia IJV trova applicazione in campo industriale grazie all'elevata capacità di trasferire calore, ma dei buoni rendimenti sono stati osservati anche nelle scuole e negli uffici. Il principio di funzionamento consiste in un getto ad alto lancio che corre lungo il pavimento e si diffonde sulla superficie dello stesso distribuendo l'aria sotto forma di uno strato molto sottile. In questo modo il getto d'aria vince la forza di galleggiamento e permette all'aria di raggiungere le zone più distanti del pavimento. Ciò, però, incrementa il rischio di correnti d'aria fredde e di stratificazione termica eccessiva. A differenza della DV, l'aria può essere riscaldata e quindi la IJV può essere applicata anche per il condizionamento invernale degli ambienti.

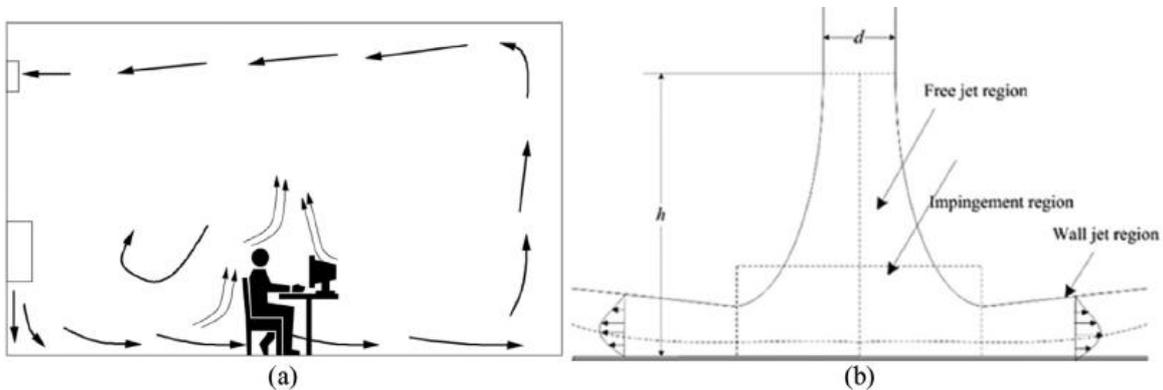


Figura 1.40. Ventilazione a getto d'urto (a) e regioni di flusso coinvolte (b) [69]

Una configurazione alternativa a quella appena analizzata consiste nella **ventilazione a getti confluenti** (CJV, *confluent jets ventilation*). Essa si basa sull'immissione di aria da un terminale dotato di molteplici ugelli, posizionato in prossimità del soffitto e adiacente ad una parete (WAV, *wall attached ventilation*). In questo modo, il getto scivola lungo il muro a causa dell'effetto Coanda, per poi distribuirsi sulla superficie del pavimento. Grazie a queste forze, la potenza assorbita dal ventilatore è inferiore rispetto a quella richiesta nei sistemi DV, MV o IJV a parità di performance di distribuzione dell'aria. Cò nonostante, le applicazioni in ambito scolastico sono ancora limitate.

Se invece venissero impiegati dei singoli diffusori ad ugello disposti attorno ad una colonna verticale (CAV, *column attached ventilation*), come rappresentato in Figura 1.41, sarebbe possibile distribuire aria fresca anche in ambienti molto estesi e con geometria particolare. Ciò può essere fatto anche in corrispondenza di una parete laterale, analogamente a quanto visto per la CJV. In questo caso si evidenzia la formazione di uno strato di aria più consistente sulla superficie del pavimento, che funge da bacino di aria fresca, promuovendo ulteriormente la qualità dell'aria e l'efficienza di ventilazione.

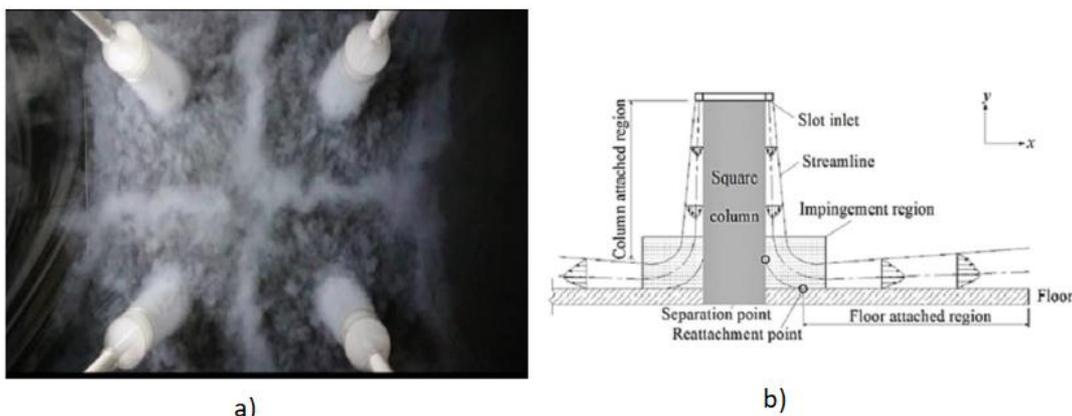


Figura 1.41. Ventilazione a getti confluenti attorno ad una colonna (a) e relativa distribuzione dei flussi (b) [69]

Il grande vantaggio di questa soluzione consiste nella possibilità di fornire elevate portate di rinnovo riducendo il rischio di correnti d'aria. Infatti, i getti sono caratterizzati da un decadimento molto rapido della zona di flusso a massima velocità. Per i criteri di progettazione si rimanda allo studio di Yin e Li [78].

1.4.2.7) Ventilazione intermittente a getto (IAJS, *intermittent air jet system*)

La ventilazione intermittente a getto introduce delle rapide variazioni della portata immessa o della velocità all'interno dell'ambiente occupato. Tali variazioni avvengono e si esauriscono nell'arco di pochi minuti e seguono una funzione periodica sinusoidale oppure a gradini. L'obiettivo consiste nell'incremento della capacità di rimozione degli inquinanti e in un maggior effetto di raffrescamento, senza però generare correnti d'aria.

Sebbene queste strategie possano essere implementate in tutti i climi, i risultati migliori si ottengono in regime di raffrescamento, ovvero dove le temperature esterne sono particolarmente elevate. I problemi consistono in una maggiore rumorosità rispetto alla MV, che ne limita fortemente l'impiego negli ambienti scolastici, oltre a maggiori costi di esercizio e di manutenzione.

1.4.2.8) Ulteriori strategie

In ambienti con destinazioni d'uso particolari, come laboratori o cucine, possono essere implementate ulteriori strategie tra cui:

- ventilazione a protezione della zona occupata (POV, *protected occupied zone ventilation*): tramite dei getti d'aria a bassa turbolenza viene creata una sorta di separazione tra uno spazio particolarmente inquinato, in cui si trovano delle fonti particolari di emissione e lo spazio in cui deve essere garantita un'elevata IAQ;
- estrazione locale: viene usata in presenza di un sorgente inquinante ad alta temperatura, come accade nelle cucine. Qui le cappe di aspirazione vengono posizionate sopra la fonte di emissione per rimuovere il contaminante prima che questo si diffonda nell'ambiente;
- ventilazione a pistone: l'aria viene erogata in verticale e in orizzontale lungo l'intera stanza a bassa velocità (di solito compresa tra 0.20 e 0.30 m/s) e turbolenza, in modo da creare un flusso a pistone. Nonostante sia il metodo più efficace per la rimozione degli inquinanti, non trova applicazione negli edifici scolastici a causa delle portate e dei costi energetici troppo elevati;
- ventilazione personalizzata (PV, *personalized ventilation*): l'idea è quella di fornire aria fresca in prossimità di ciascun occupante mediante dei terminali progettati ad hoc, una cui possibile rappresentazione è fornita in Figura 1.42.

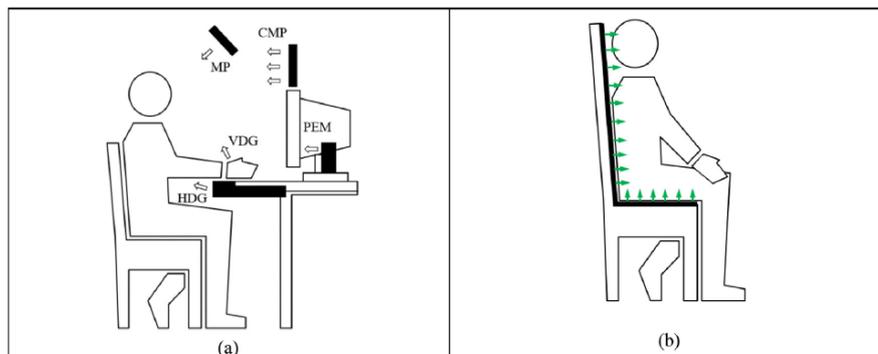


Figura 1.42. Ventilazione personalizzata attraverso opportuni dispositivi (a) oppure attraverso la sedia (b) [69]

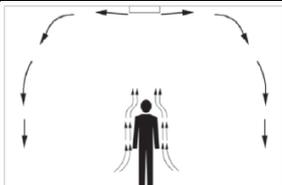
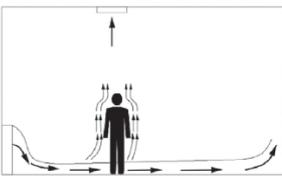
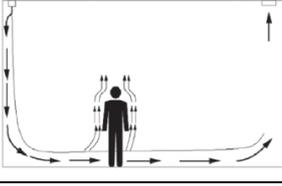
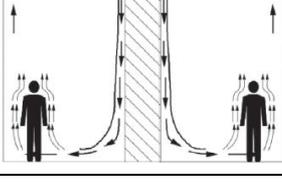
I vantaggi principali dei sistemi PV rispetto a quelli tradizionali consistono nel miglioramento della qualità dell'aria respirata e nella possibilità di controllare la temperatura e la velocità del flusso in ingresso a seconda della propria percezione di comfort termico. Ciò consente di ridurre le portate complessive elaborate dall'impianto mediante la rimozione locale dell'aria esalata e dei bioeffluenti prodotti prima che questi si mescolino con l'aria ambiente. La ventilazione personalizzata comporta delle efficienze fino a 20 volte superiori rispetto alla MV, oltre alla percezione di una migliore IAQ.

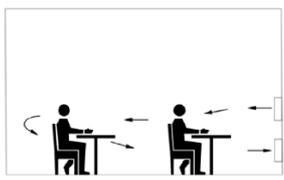
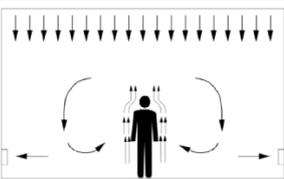
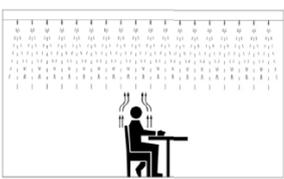
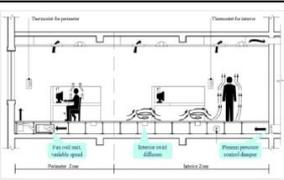
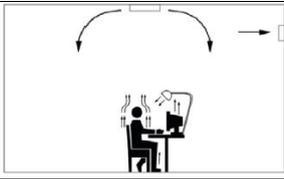
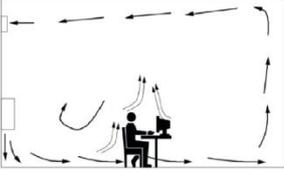
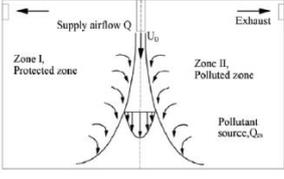
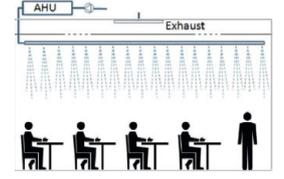
I problemi possono presentarsi con temperature dell'aria ambiente superiori a 26°C, perché in tali condizioni è difficile garantire un buon confort termico senza avere fenomeni di correnti d'aria. Inoltre, la portata di aria diretta verso il viso degli occupanti potrebbe dar luogo ad un eccessivo movimento delle palpebre e all'irritazione di occhi e viso.

Il grande potenziale di questa applicazione consiste nel prevenire la trasmissione di batteri e virus, soprattutto in presenza di ventilazione a miscelazione. Lo stesso potenziale può comunque essere salvaguardato anche con altre strategie, nell'ipotesi in cui alla ventilazione personalizzata venga integrata l'estrazione personale. Può dunque proporsi come una soluzione "alternativa" alla lotta contro la diffusione del Covid-19.

In Tabella 1.16 vengono riassunte le caratteristiche più importanti delle strategie analizzate:

Tabella 1.16. Confronto tra le principali strategie di distribuzione dell'aria [69]

Strategia	Caratteristiche aria immessa	Posizione terminali	ϵ^a [%]	ϵ	Comfort termico
MV	 Grande ΔT rispetto all'ambiente occupato, alta velocità	Immissione dal soffitto, estrazione dal soffitto o dal pavimento	50	1.0	Piccolo ΔT tra testa e piedi
DV	 Piccolo ΔT rispetto all'ambiente occupato, bassa velocità	Immissione dal pavimento, estrazione dal soffitto	50-100	1.2-1.5	Grande ΔT tra testa e piedi
WAV	 Grande ΔT rispetto all'ambiente occupato, alta velocità	Immissione dal soffitto, estrazione dal soffitto o dal pavimento	50-100	1.1-1.4	Piccolo ΔT tra testa e piedi
CAV	 Grande ΔT rispetto all'ambiente occupato, alta velocità	Immissione ed estrazione dal soffitto	50-100	1.1-1.3	Piccolo ΔT tra testa e piedi

SV		Piccolo ΔT rispetto all'ambiente occupato, alta velocità	Immissione a parete, estrazione a parete, soffitto o pavimento	-	1.3-1.8	Piccolo ΔT tra testa e piedi
DCV		Grande ΔT rispetto all'ambiente occupato, bassa velocità	Immissione dal soffitto, estrazione dal soffitto o dal pavimento	50	1.0	Piccolo ΔT tra testa e piedi
CJV		Medio ΔT rispetto all'ambiente occupato, media velocità	Immissione a differenti altezze	50-60	1.1-1.2	ΔT minore rispetto a DV, ma maggiore di MV
UFAD		Medio ΔT rispetto all'ambiente occupato, media velocità	Immissione dal pavimento ed estrazione dal soffitto	50-100	1.1-1.3	Moderato ΔT tra testa e piedi
PV		Getti con differenti direzioni	Immissione in prossimità degli occupanti	-	2-50	Ottimo comfort termico
IJV		Medio ΔT rispetto all'ambiente occupato, media velocità	Immissione a parete a metà altezza, estrazione a parete in alto	50-60	1.1-1.2	ΔT minore rispetto a DV, ma maggiore di MV
POV		Velocità medio-alte (tra 1 e 2 m/s)	Immissione dall'alto, estrazione da soffitto o pavimento	50	1.0	-
IAJS		Medio ΔT rispetto all'ambiente occupato, media velocità	Immissione dal soffitto, estrazione da soffitto o pavimento	50-60	1.1-1.2	Possibili correnti fredde con basse temperature

1.4.3) Bilanciamento

Il processo di **analisi** (*testing*), **regolazione** (*adjusting*) e **bilanciamento** (*balancing*) di un impianto aeraulico, noto in letteratura con il termine *TAB procedure*, permette di **ottimizzare il funzionamento della ventilazione meccanica**, con importanti benefici sia dal punto di vista energetico che dell'IAQ. La distribuzione dell'aria avviene attraverso appositi condotti, caratterizzati da lunghezze differenti a seconda della distanza che intercorre tra il collettore di mandata e la bocchetta di immissione in ambiente. Ad esse corrispondono delle cadute di pressione, calcolate in funzione della velocità e della portata di progetto, che dovranno essere vinte dal ventilatore affinché in ciascun locale vengano mantenute le condizioni di IEQ richieste. Sulla base di queste perdite di carico, viene effettuata una taratura preventiva dell'impianto, impostando di conseguenza le serrande delle diverse tratte. Ciò nonostante, le modiche approntate in fase esecutiva e le variazioni delle perdite di carico rispetto ai valori di design, fanno sì che l'impianto possa sbilanciarsi e che nei locali più sfavoriti il ricambio d'aria sia inadeguato alle reali necessità degli occupanti. L'impianto, una volta sbilanciatosi, dà luogo a numerose problematiche, che dovranno essere risolte mediante una taratura a posteriori condotta attraverso la *TAB procedure*. L'obiettivo è dunque quello di **prevenire i seguenti fenomeni**:

- **rumori e fischi**, dovuti a portate troppo elevate negli ambienti più vicini al collettore;
- **scarsa IAQ nei locali più penalizzati**, con un maggior ristagno di odori, accumulo di umidità e possibile formazioni di muffa in corrispondenza dei ponti termici;
- **minore efficienza di recupero termico**.

Quest'ultimo aspetto, sebbene non incida direttamente sulla qualità dell'aria interna, ha delle importanti ripercussioni sulla resa energetica dell'impianto. Infatti, i rendimenti di recupero termico dichiarati dal produttore presuppongono che i flussi in immissione e in espulsione siano uguali, in conformità alle norme UNI EN 308 [79] e UNI EN 13141-7 [80]. Se ciò non accadesse, le penalizzazioni potrebbero anche essere importanti: ad esempio, considerando uno scambiatore in controcorrente con efficienza del 93%, ad uno sbilanciamento delle portate del 20% corrisponde un rendimento reale di recupero pari al 74%.

La *TAB procedure* prevede l'utilizzo di determinati strumenti di misura con cui rilevare le portate elaborate dai condotti e dai terminali. In Tabella 1.17. vengono elencate le caratteristiche dei dispositivi più utilizzati in tale ambito:

Tabella 1.17. *Strumenti di misura utilizzati per le procedure di bilanciamento*

Strumento	Grandezza	Caratteristiche
Anemometro e cono di misura	Portata d'aria [m ³ /h]	Il cono deve adattarsi alla dimensione del terminale. Ottima accuratezza, ma è richiesta competenza specialistica.
Anemometro a filo caldo o a palette	Velocità aria [m/s]	Vengono eseguite misure in più punti della sezione di uscita di una bocchetta per risalire alla velocità media. Per il calcolo della portata è richiesta una stima della superficie di passaggio. Ciò comporta minore accuratezza rispetto al sistema con cono di misura.

Tubo di Pitot con manometro	Velocità aria [m/s]	Vengono effettuate misure in più punti di un condotto, praticando se necessario dei fori per l'applicazione degli strumenti. Necessari calcoli per risalire alla portata e quindi bassa accuratezza.
-----------------------------	---------------------	--

In alternativa all'utilizzo del tubo di Pitot, per misurare la portata elaborata da un condotto è possibile applicare la cosiddetta "gas-tracer technique". Essa consiste nell'iniezione di un gas (CO₂, SF₆ o perfluorocarburi) ad un tasso costante, in un punto a monte rispetto alla sezione di misura; dopodiché, nota la concentrazione raggiunta in condizioni di equilibrio, è possibile risalire alla portata d'aria in m³/s. Questo metodo, dunque, è caratterizzato da una maggiore accuratezza rispetto a quelli tradizionali, in quanto non richiede la conoscenza della superficie di passaggio del flusso e riduce il numero di rilevazioni necessarie [81]. Ciò nonostante, è necessario considerare anche il potenziale di effetto serra associato all'impiego di tali gas, privilegiando i fluidi meno impattanti o preferendo ad essi i metodi tradizionali di misura con tubo di Pitot. Ulteriori considerazioni sono riassunte in Tabella 1.18.:

Tabella 1.18. Confronto tra la misura con tubo di Pitot e con gas-tracer technique

Caratteristiche della misura	Tubo di Pitot	Gas-tracer technique
Misura in un condotto di forma diversa	necessarie più misure per ottenere la velocità media nella sezione di passaggio	singola misura nella sezione di passaggio
Unità di misura di output per il bilanciamento	viene misurata la velocità media in m/s, da moltiplicare per la sezione di passaggio del tubo	portata d'aria in m ³ /s
Posizione del punto di misura	sufficientemente distante dalle curve, in un tratto di tubo rettilineo	nessuna limitazione
Presenza di turbolenza	riduce l'accuratezza di misura	aumenta l'accuratezza di misura
Range di misura	non adatto a misurare velocità < 1 m/s	nessuna limitazione
Altre potenzialità	nessuna	è possibile valutare la classe di ermeticità dell'intero impianto

Dal punto di vista normativo, la UNI EN 12599 [82] impone una serie di controlli e misure, da eseguire al momento dell'avviamento del sistema di ventilazione, per salvaguardarne l'efficienza e il funzionamento. Alcune di queste misure, riportate in Tabella 1.19 in funzione della tipologia di impianto, sono obbligatorie, mentre altre sono solamente raccomandate oppure non necessarie. Ciò nonostante, tutti i controlli effettuati devono essere opportunamente registrati e documentati nel protocollo di consegna dell'impianto.

La stessa norma, inoltre, prescrive delle incertezze massime di misura, a cui gli strumenti impiegati per il bilanciamento devono essere soggetti e propone dei metodi di rilevazione della velocità e della portata in corrispondenza delle condotte e dei terminali d'impianto.

Tabella 1.19. Misure da effettuare all'avviamento dell'impianto di ventilazione secondo UNI EN 12599

Impianto	Misure nelle condotte		Misure per ogni ambiente		
	Portata	Temperatura	Portata immessa	Portata estratta	Umidità
Ventilazione	obbligatoria	non necessaria	obbligatoria	su richiesta	non necessaria
Ventilazione e riscaldamento	obbligatoria	obbligatoria	obbligatoria	su richiesta	non necessaria
Ventilazione e raffrescamento	obbligatoria	obbligatoria	obbligatoria	su richiesta	obbligatoria
Ventilazione, raffrescamento, deumidificazione	obbligatoria	obbligatoria	obbligatoria	su richiesta	su richiesta

Indipendentemente dalla strumentazione adottata, la *TAB procedure* consta di una serie di azioni che devono essere ripetute iterativamente, fino al raggiungimento delle condizioni desiderate. Per una descrizione dettagliata del metodo in funzione della tipologia di impianto, si rimanda agli studi di settore e in particolare alla norma americana *ANSI/ASHRAE Standard 111-2008: Measurement, Testing, Adjusting, and Balancing of Building HVAC Systems* [56].

In estrema sintesi, il meccanismo si articola nelle seguenti fasi:

- 1) misura della portata di ogni singola bocchetta, mantenendo tutte le valvole aperte;
- 2) somma delle portate di immissione ed estrazione per verificare che lo scarto sia minore di $\pm 5\%$;
- 3) verifica della portata in ciascun ambiente e scostamento rispetto al valore di progetto;
- 4) taratura dei terminali e delle condotte, agendo sull'apertura/chiusura delle valvole. Si consiglia di partire dai punti più penalizzati dell'impianto, e di procedere a ritroso fino alle condotte di distribuzione principali;
- 5) ripetizione delle fasi 1-4 fintantoché in tutte le sezioni di misura si abbiano gli stessi rapporti tra la portata rilevata e quella di progetto;
- 6) regolazione del numero di giri del ventilatore per far sì che i rapporti calcolati in precedenza tendano al valore unitario.

Dal punto di vista pratico, questo procedimento è ben più complicato di quanto possa in apparenza sembrare: infatti, in media, prima di ottenere un risultato soddisfacente, è necessario effettuare le misurazioni in tutte le bocchette e le conseguenti regolazioni sui condotti per circa tre volte [83]. Ciò comporta un notevole dispendio di tempo.

Si ricorda inoltre l'importanza di affidarsi ad uno specialista, che utilizzi degli strumenti di misura ad elevata accuratezza, inferiore, se possibile, al 5%. Questi, secondo le raccomandazioni descritte in

ANSI/ASHRAE Standard 111, andrebbero posizionati in modo opportuno a seconda della presenza o meno di curve e/o restringimenti, come rappresentato nell'esempio di Figura 1.43; le stesse raccomandazioni, inoltre, invitano alla scelta dei dispositivi di bilanciamento, come valvole e serrande, sulla base delle perdite di carico massime associate al loro esercizio, affinché non si creino rumori fastidiosi.

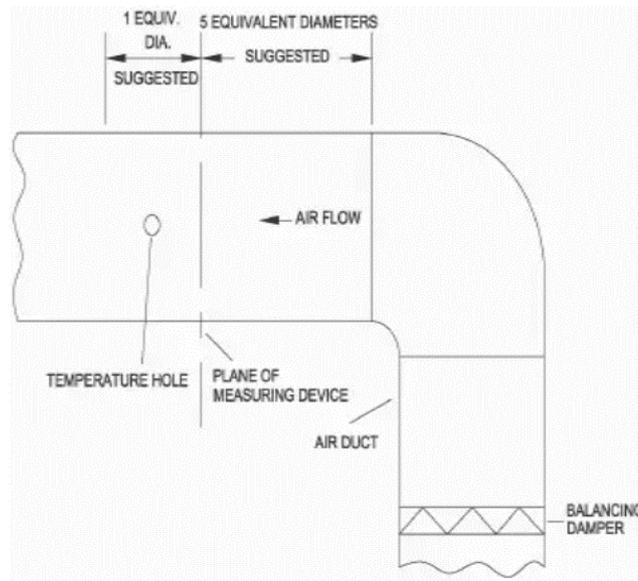


Figura 1.43. Esempio di un corretto posizionamento degli strumenti di misura di temperatura e portata [56]

Dalla descrizione di cui sopra, appare evidente come la *TAB procedure* non possa prescindere dalle seguenti operazioni:

- a) misura delle portate in corrispondenza dei terminali e delle condotte (testing);
- b) regolazione delle valvole e delle serrande poste lungo tutto l'impianto (balancing);
- c) regolazione della velocità di rotazione del ventilatore (adjusting).

In alternativa al processo iterativo analizzato in precedenza, è possibile implementare dei metodi più sofisticati per il bilanciamento dell'impianto, che prevedono un'analisi numerica della distribuzione dei flussi all'interno delle condotte. È il caso del "*progressive flow method*" proposto da F. Pedranzini *et al.* [84], il quale, oltre ai dispositivi di misura e di regolazione normalmente utilizzati, prevede l'impiego di un ventilatore a velocità variabile dotato di inverter. Quest'ultimo interagisce, per mezzo di un controller, con una sonda che monitora la portata elaborata dal terminale più penalizzato, la cui valvola, in fase di bilanciamento, deve rimanere completamente aperta. Fatte queste premesse, il meccanismo si declina nei seguenti passaggi:

- 1) dopo aver verificato che tutte le restanti valvole siano chiuse, viene regolata la velocità del ventilatore affinché la bocchetta più sfavorita (1) rilasci la portata di progetto \dot{Q}_1 ;
- 2) prima di procedere con il secondo terminale, il sistema formato da controller e sonda deve essere collegato alla prima bocchetta (1), le cui condizioni operative rimarranno dunque invariate. Infatti

l'inverter, interagendo con il sistema di controllo, andrà a modificare progressivamente il numero di giri della macchina in modo tale da garantire sempre il rilascio del flusso \dot{Q}_1 ;

- 3) il terminale successivo (2) viene tarato utilizzando i consueti sistemi di misura (balometro) e agendo sulla posizione della valvola, indicata con il termine θ_2 in Figura 1.44, fino a raggiungere la portata di progetto \dot{Q}_2 . La suddetta operazione deve essere ripetuta per ogni terminale, fino al bilanciamento dell'intera condotta.

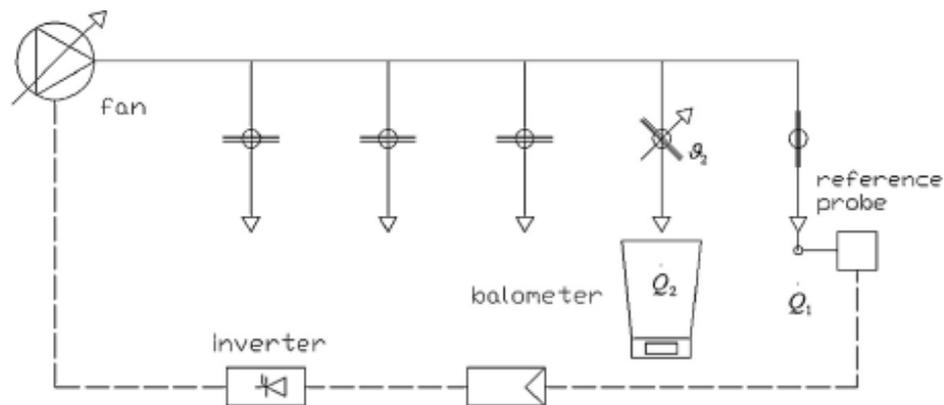


Figura 1.44. Rappresentazione schematica del metodo di bilanciamento non iterativo con sonda e controller [84]

Nel caso in cui non sia possibile ottenere la portata di progetto in corrispondenza di una bocchetta, sebbene completamente aperta, si suggerisce di introdurre una valvola nel tratto di condotta a monte della bocchetta stessa; in questo modo, introducendo delle perdite di carico concentrate, possono essere garantiti i ricambi d'aria di design in ogni ambiente, senza apportare alcuna modifica alla posizione delle rimanenti valvole. Ciò introduce un ulteriore vantaggio rispetto ai metodi classici di bilanciamento, che richiederebbero una ripetizione di tutto il processo di taratura.

Infine, le fasi 1-3 devono essere applicate a ciascun ramo dell'impianto, partendo dal più svantaggiato. Viene così effettuato il completo bilanciamento della rete di distribuzione, con un risparmio importante in termini di tempo: dato un generico sistema di n terminali e b condotte, possono essere evitate $2n+b-1$ misure rispetto ad un metodo di taratura tradizionale.

L'impiego di un ventilatore dotato di inverter si rileva fondamentale anche per una regolazione efficiente della portata di ventilazione, soprattutto se accoppiato ad un sistema di monitoraggio della CO_2 .

1.4.4) Controllo della ventilazione

I **systemi di controllo** sono essenziali per il mantenimento della qualità dell'aria, del comfort termico e dell'efficienza energetica. Essi sono costituiti da un **insieme di sensori e attuatori che comandano la ventilazione assicurando l'esercizio dell'impianto nelle condizioni ottimali di funzionamento**. Di seguito alcune raccomandazioni generali:

- garantire agli occupanti la trasparenza nel controllo della ventilazione, mediante comandi manuali ad azione rapida che possano interagire con il sistema automatico;

- evitare che gli utenti possano compromettere le funzionalità dell'impianto, impedendo l'accesso a determinati comandi;
- i comandi devono essere semplici e comprensibili.

I **sensori più utilizzati** per il controllo della ventilazione meccanica prevedono il monitoraggio dei seguenti parametri:

- **concentrazione di CO2 o di altri gas specifici;**
- **umidità relativa;**
- **presenza degli occupanti;**
- **temperatura;**
- **carichi solari.**

Nei sistemi più datati la regolazione della portata avviene mediante dei sensori che, interagendo con opportuni attuatori, comandano l'angolo di apertura/chiusura delle valvole poste all'interno dei canali di immissione. Questo metodo, sebbene risponda alle reali esigenze degli occupanti, non è efficace da un punto di vista energetico, in quanto introduce delle perdite di carico che dissipano parte dell'energia elaborata dal ventilatore. Viceversa, nei sistemi più recenti, i segnali arrivano direttamente alla centralina di controllo del motore elettrico, dando luogo ad una variazione del numero di giri dello stesso e quindi della velocità di rotazione della macchina. In questo modo, la portata viene regolata agendo direttamente sulla potenza assorbita dal ventilatore, senza dissipazione di energia. Ciò può avvenire per mezzo di un normale motore trifase accoppiato ad un inverter oppure mediante un motore asincrono a magneti permanenti.

Oltre all'impiego di queste tecnologie, è possibile modificare la portata sfruttando uno dei seguenti metodi/dispositivi:

- variazione del passo delle pale con ventilatori assiali;
- utilizzo di pale a calettamento variabile all'ingresso;
- serrande;
- valvole regolatrici di pressione;
- bocchette di regolazione della portata.

Sebbene i metodi di regolazione della portata siano molteplici, si raccomanda di utilizzare sempre motori dotati di inverter o motori asincroni a magneti permanenti, che consentono di minimizzare le perdite energetiche durante il funzionamento a carico parziale.

[1.4.4.1\) Gestione dei ventilatori di immissione e di estrazione](#)

Lo stato dell'arte della ventilazione meccanica controllata prevede l'impiego congiunto di ventilatori a velocità variabile e di dispositivi di regolazione della portata, come le valvole. Infatti, ipotizzando che ciascun locale si comporti come un'unica zona termica e sia quindi dotato di un proprio condotto di

immissione e di estrazione, una variazione della portata erogata in un ambiente può dar luogo a degli squilibri, che dovranno essere compensati dall'azione del ventilatore. In particolare, le serrande vanno posizionate nei canali di mandata e di ritorno di ogni locale, affinché possano essere movimentate in modo sincronizzato mediante un semplice algoritmo di controllo. Quest'ultimo riceve in ingresso le letture di uno o più sensori a seconda dei parametri monitorati e restituisce come output il grado di apertura delle valvole. Ciò consente una gestione molto accurata della portata immessa in ciascuna zona termica e, più in generale, della qualità ambientale interna alle stesse. Al contempo, per ridurre il consumo energetico dell'impianto, si suggerisce di installare due sensori di pressione statica, uno nel canale di immissione a valle del ventilatore di mandata e l'altro all'interno dell'ambiente occupato, entrambi da collegare ai sistemi di regolazione della velocità dei rispettivi ventilatori, per far sì che in tali posizioni la pressione dell'aria rimanga costante, come rappresentato in Figura 1.45. In questo modo, oltre a minimizzare la potenza elettrica assorbita dai motori, è possibile contenere il fenomeno di sbilanciamento delle portate causato dalle continue variazioni del carico e quindi delle cadute di pressione [58].

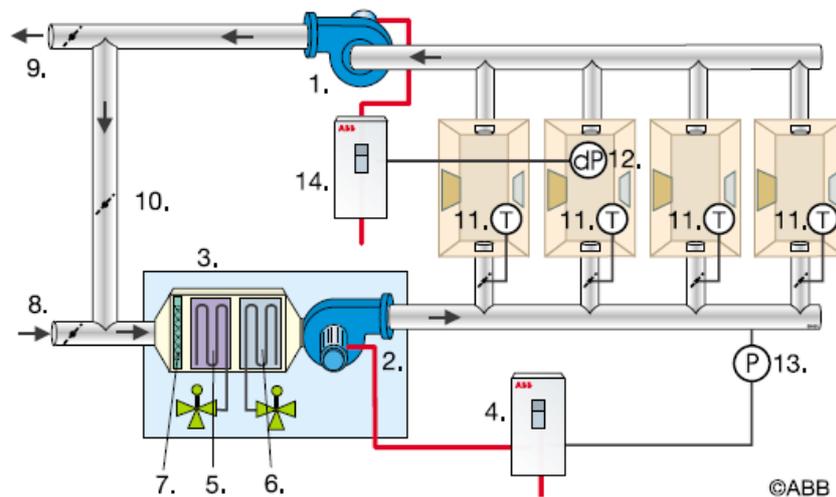


Figura 1.45. Sistema VAV con ventilatori a velocità variabile [40]

Vi sono poi ulteriori tecniche con cui è possibile controllare la velocità di rotazione del ventilatore di estrazione. Nei sistemi VAV, infatti, si è soliti lavorare con una portata di immissione maggiore rispetto a quella di estrazione per prevenire l'ingresso di aria esterna attraverso le infiltrazioni. Ciò implica che le due grandezze debbano essere legate l'una all'altra, in modo da evitare che l'impianto si sbilanci eccessivamente. Di conseguenza, il numero di giri del ventilatore di estrazione dovrebbe seguire le variazioni del tasso di rinnovo, a sua volta funzione dei parametri interni monitorati. In particolare, in alternativa al metodo precedentemente esposto relativo al controllo della pressione statica, è possibile implementare lo schema di Figura 1.46.

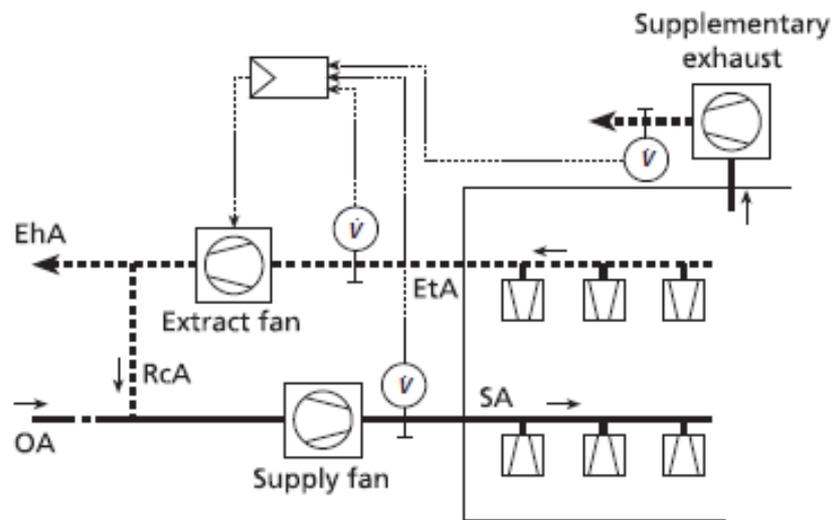


Figura 1.46. Controllo della velocità del ventilatore di estrazione tramite monitoraggio del flusso d'aria [92]

Esso si serve di due sensori di velocità, uno posto a valle del ventilatore di immissione e l'altro a monte di quello di estrazione, per ottenere in uscita la misura delle portate volumetriche corrispondenti. Queste vengono poi confrontate tra loro, tenendo conto dell'eventuale presenza di un'estrazione locale supplementare e la velocità di rotazione del ventilatore di ripresa viene modulata affinché il rapporto tra le due portate rimanga costante [92].

1.4.4.2) Regolazione della portata mediante sensori di CO₂

Per **spazi soggetti ad occupazione variabile o intermittente**, il **controllo della ventilazione** permette di **modulare la portata di rinnovo in funzione delle reali necessità**. In questo modo, può essere mantenuto lo stesso target di qualità dell'aria, ma con un consumo energetico di gran lunga inferiore. Infatti, se la regolazione fosse basata sull'apertura/chiusura dell'edificio, l'impianto verrebbe esercitato costantemente alla portata di progetto, calcolata nell'ipotesi di massima occupazione, indipendentemente dalla presenza o meno degli studenti nelle aule. Si intuisce pertanto l'esigenza di un sistema di controllo che possa rispondere, con tempi sufficientemente ridotti, all'effettiva richiesta di ventilazione. Quest'ultima può essere parametrizzata in funzione della concentrazione di CO₂ (DCV-CO₂) raggiunta all'interno delle aule: tale parametro, infatti, è proporzionale al numero di persone presenti e fornisce un feedback diretto dell'andamento degli altri inquinanti a seconda del tasso di ricambio.

Si ricorda comunque la necessità di garantire una ventilazione minima, corrispondente al 20-30% della portata di progetto, durante gli intervalli e nei periodi di non occupazione, per smaltire le sostanze emesse dai materiali, dagli arredi e dai prodotti di pulizia. Ancora, si consiglia di effettuare una pre-aerazione degli ambienti prima dell'occupazione con ricambio almeno pari a 2 Vol/h. Tali indicazioni devono essere opportunamente "corrette" in ottica di prevenzione alla diffusione del Covid-19, come riportato al paragrafo 1.4.9.

Il controllo della concentrazione interna di CO₂ rappresenta quindi il metodo più efficace ed efficiente per la regolazione del ricambio d'aria in edifici scolastici provvisti di VMC. A tale scopo, possono essere implementate tre diverse strategie:

- 1) **Controllo di set-point:** la portata in ingresso viene controllata attraverso l'apertura/chiusura della valvola di immissione o mediante un funzionamento on/off del ventilatore. Ciò accade quando la concentrazione di CO₂ misurata dal sensore supera un livello massimo di set point; a quel punto la portata di aria fresca fluisce all'interno del locale occupato fino a quando non viene raggiunto un livello minimo di set point, in corrispondenza del quale la valvola chiude o il ventilatore si spegne. La differenza tra i due valori prefissati non deve essere né troppo grande né troppo piccola: nel primo caso, infatti, la risposta del sistema avverrebbe con tempi troppo lunghi, mentre nel secondo caso si avrebbero dei cicli di accensione/spegnimento troppo frequenti, che andrebbero a ridurre la vita media dei componenti dell'impianto.
- 2) **Controllo proporzionale:** comporta l'apertura progressiva della valvola di immissione o la variazione del numero di giri del ventilatore quando la concentrazione interna di CO₂ aumenta rispetto a quella esterna. Anche in questo caso, è necessario fissare gli estremi del range di regolazione, ovvero un livello minimo (C_{LSP}) e massimo (C_{USP}) di CO₂ a cui corrispondono, rispettivamente, la portata minima (V_B) e la portata di progetto (V_{DVR}) elaborate dall'impianto. All'interno di questo intervallo, il sistema di controllo lavora per punti di equilibrio, agendo sull'angolo di apertura della valvola o sulla velocità del ventilatore a seconda della concentrazione di CO₂ rilevata (C_I). Quest'ultima viene dunque utilizzata dall' algoritmo come dato di ingresso, per far sì che l'impianto elabori la portata effettivamente richiesta (V_{DC}) ed esprimibile come:

$$V_{DC} = V_B + (V_{DVR} - V_B) \frac{C_I + C_{LSP}}{C_{USP} + C_{LSP}} \quad [m^3/h]$$

dove V_{DVR} corrisponde al prodotto tra l'occupazione massima e il tasso di ventilazione per persona (ad esempio 8 L/s o un valore desunto dalle norme).

- 3) **Controllo esponenziale:** lavora secondo una logica simile al controllo proporzionale, ma secondo una curva diversa. Infatti, in spazi molto grandi, l'incidenza della portata di ventilazione sull'andamento della concentrazione di CO₂ è inferiore rispetto a quanto accadrebbe in locali a più alta densità di occupazione. Ciò comporta che la regolazione debba avvenire con maggiore sensibilità alle variazioni della CO₂ e per un elevato numero di punti di lavoro. A tale proposito, vengono implementati degli algoritmi in grado di minimizzare i tempi di risposta del sistema di controllo, come i codici PI (proporzionale-integrale) e PID (proporzionale-integrale-derivativo).

Il controllo di set-point, sebbene "rudimentale" e meno efficiente rispetto ai secondi, si adatta molto bene a spazi con una densità di occupazione maggiore di 20 persone per 100 m², come quelli scolastici, a patto che i tempi di risposta del sistema siano sufficientemente brevi. Si consiglia inoltre di fissare una concentrazione minima di CO₂ superiore di 100 - 150 ppm rispetto a quella esterna, e una concentrazione massima di 950 o 1200 ppm a seconda della categoria di IEQ che si intende raggiungere (a tale proposito si veda UNI EN 16798-1). Questi valori possono essere adottati anche nel controllo proporzionale, mediante il quale è possibile ottenere un maggiore risparmio energetico, in quanto il sistema di

regolazione agisce su più punti di lavoro. Infine, la logica esponenziale, raccomandata in ambienti molti ampi come auditorium e sale conferenza, comporta degli ulteriori benefici dal punto di vista energetico, ma a spese di una maggiore complessità e di costi più elevati [85]. Il Protocollo CasaClima School, ad esempio, richiede una regolazione proporzionale del ventilatore tramite un inverter comandato da sensori di CO₂ in ambiente, in modo tale che il controllo della portata avvenga locale per locale [15].

Le tre strategie finora analizzate lavorano sotto l'ipotesi di condizioni di equilibrio, che sono però molto difficili da raggiungere; ciò crea un margine importante di risparmio, che può essere colmato mediante un modello di controllo dinamico. L'idea è quella di imporre una ventilazione di base per i periodi di non occupazione e di calcolare il tasso di ricambio orario risolvendo il bilancio di massa di CO₂, per far sì che la concentrazione di anidride carbonica aumenti in modo pressoché costante fino a raggiungere il valore di set point al termine delle ore di lezione, minimizzando il consumo dell'impianto di ventilazione. Infatti, lo studio condotto da Lu *et al.* [86] mostra come il controllo dinamico dia luogo, rispetto alla logica proporzionale, ad un risparmio energetico compreso tra il 26 e il 34%, a seconda che l'edificio venga occupato frequentemente o saltuariamente.

Il metodo dinamico può essere utilizzato anche per la regolazione di sistemi multi-zona: in questo caso la configurazione dell'impianto non cambia ed è sufficiente dare in pasto all'algoritmo di calcolo l'organizzazione degli orari di lezione e degli intervalli di ciascuna classe, oltre ad individuare il locale più critico nel quale installare il sensore di CO₂; come conseguenza, i restanti ambienti potrebbero essere sottoposti ad una ventilazione eccessiva. Questo effetto può essere in parte mitigato modificando la posizione del sensore di CO₂, collocandolo in particolare nel condotto di immissione, come suggerito da N. Nassif [87].

Si consiglia di far lavorare l'impianto di ventilazione in modalità di free cooling quando le condizioni lo consentono, assicurandosi che il sistema di controllo non interferisca con tale modalità di funzionamento. Analogamente, prima dell'orario di lezione e dopo le operazioni di pulizia, il ricambio d'aria dovrebbe essere "svincolato" dalla concentrazione interna di CO₂, per impedire che gli inquinanti emessi dai materiali e dai prodotti di sanificazione possano raggiungere dei livelli pericolosi. A tal fine, si suggerisce l'installazione di sensori che rilevino la presenza di più contaminanti: ad esempio, nei locali in cui si trovano stampanti e fotocopiatrici, la ventilazione dovrebbe essere vincolata alla concentrazione di ozono piuttosto che all'anidride carbonica.

Si è già osservato come il **posizionamento dei sensori all'interno degli spazi occupati richieda grande attenzione**, affinché le letture provenienti dagli stessi siano rappresentative delle condizioni ambientali ivi presenti. Se si assume la CO₂ come indicatore degli altri inquinanti, il sensore che ne monitora la concentrazione andrebbe posizionato in modo opportuno a seconda della strategia di ventilazione implementata e dell'occupazione. A tale proposito, lo studio condotto da G. Pei *et al.* [88] ha dimostrato come, in presenza della ventilazione a dislocamento (DV), vi sia un gradiente verticale di concentrazione di CO₂ e ciò comporta che la misura effettuata in corrispondenza della bocchetta di estrazione non sia rappresentativa delle condizioni percepite dagli occupanti. Infatti, come rappresentato in Figura 1.47, la concentrazione di CO₂ aumenta considerevolmente con l'altezza dal pavimento, soprattutto in ambienti ad elevata occupazione. Ne consegue una sovrastima della richiesta di ventilazione e un maggiore

consumo energetico da parte dell'impianto. Per porre rimedio a questo fenomeno, si suggerisce di collocare il sensore su uno dei muri perimetrali, ad un'altezza di circa 1.2 m e, se possibile, in un punto riparato dalla respirazione delle persone. Invece, nel caso della ventilazione a miscelazione (MV), la CO₂ si distribuisce in modo pressoché uniforme all'interno dei locali. Ciò consente di posizionare il sensore in corrispondenza della bocchetta di estrazione.

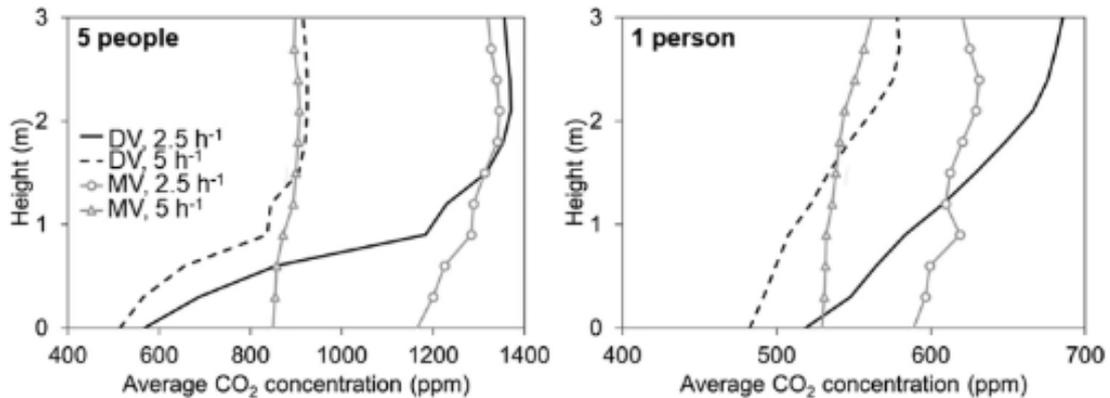


Figura 1.47. Profili verticali delle concentrazioni medie orizzontali di CO₂ con cinque occupanti (a sinistra) e un occupante (a destra) [88]

Una soluzione alternativa, che prescinde dalla strategia di ventilazione adottata, prevede l'installazione del sensore di CO₂ nel condotto di immissione dell'aria, come rappresentato in Figura 1.48. Tale sistema, proposto nel già accennato studio di Nassif [87], richiede l'implementazione di un algoritmo di controllo PI o PID che monitori la concentrazione di CO₂ nel condotto di immissione e aggiusti di conseguenza le valvole di presa dell'aria esterna.

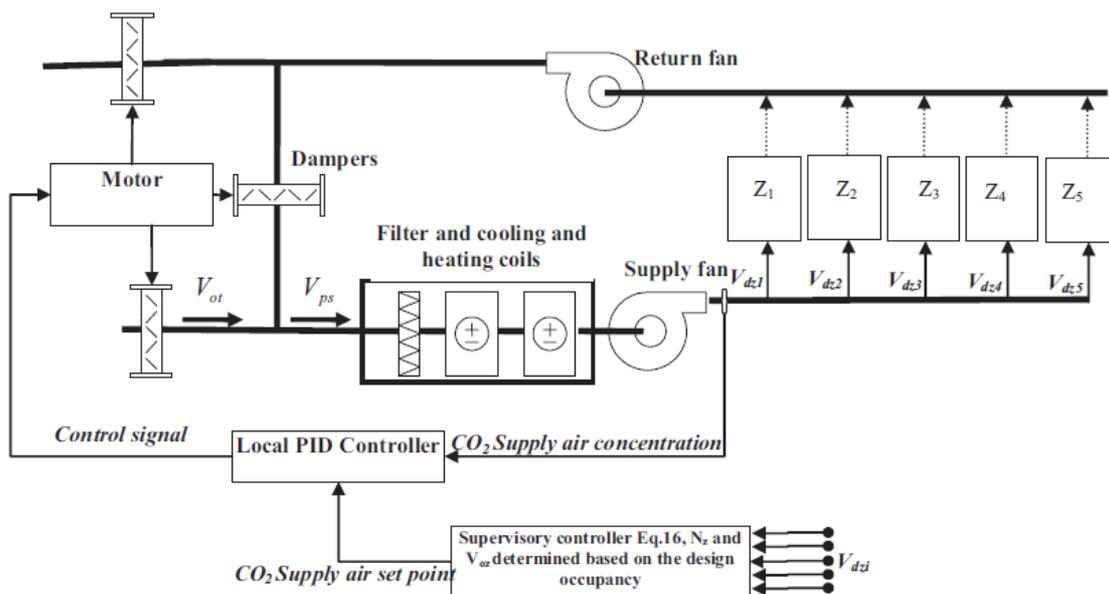


Figura 1.48. Sistema di controllo di un impianto VAV con sensore di CO₂ nel canale di immissione [87]

L'output del controller viene determinato comparando il livello di CO₂ misurato con il valore di set point e da questo confronto viene inviato un segnale alla centralina per modificare la posizione delle valvole e con esse il numero di giri del ventilatore. Il set point si resetta automaticamente con una ben determinata cadenza temporale (5 minuti) in funzione delle portate effettive in ciascun ambiente e/o dell'occupazione, da fissare mediante un'interfaccia digitale.

Il controllo della ventilazione mediante il monitoraggio della concentrazione interna di CO₂ è caratterizzato da un tempo di ritardo intrinseco rispetto alla variazione dell'occupazione, a causa dei fenomeni che regolano la diffusione di un contaminante in aria. In particolare, studi di letteratura [89] dimostrano come, ad un incremento del numero di persone, la CO₂ aumenti con un ritardo temporale di circa 10-20 minuti. Per porre rimedio a questo effetto possono essere utilizzati i sensori a rilevazione di presenza (DCV-IR), i quali, sfruttando la tecnologia ad infrarossi (PIR), sono in grado di rilevare il numero esatto di occupanti, tarando di conseguenza la portata di ventilazione da immettere. In alternativa, sono disponibili sul mercato dei sensori PIR più economici, che registrano l'assenza o la presenza di persone in un determinato ambiente, senza contarne il numero effettivo.

In generale, la scelta tra le due tecnologie di controllo deve essere ponderata a seconda della capacità delle classi, del tasso di assenteismo e degli orari di esercizio. Ad esempio, se una classe viene occupata al 100% delle proprie potenzialità e se le assenze sono trascurabili nell'arco dell'anno, la convenienza di un impianto DCV-IR supera quella di un analogo impianto DCV-CO₂, non solo da un punto di vista energetico ma anche economico: i sensori PIR, infatti, sono meno costosi, più longevi e più robusti rispetto ai sensori di CO₂ [90].

Anche la temperatura riveste un ruolo chiave per il mantenimento di una qualità ambientale interna accettabile. Analogamente alla CO₂, si consiglia di posizionare il sensore interno in prossimità dell'estrazione, mentre quello esterno, se presente, andrebbe collocato in un punto esposto a nord, al riparo dai raggi solari. Con la ventilazione a dislocamento, si suggerisce invece di predisporre un sensore ad un'altezza corrispondente alla testa degli occupanti, considerati seduti, e lontano da correnti d'aria.

Di solito, il sensore di temperatura dispone anche di un sistema di misura dell'umidità relativa, in modo da fornire un quadro completo delle condizioni termo-igrometriche interne, regolando la portata in funzione del grado di occupazione e dell'attività. In particolare, negli ambienti scolastici dovrebbe essere garantita un'umidità interna superiore al 30%, mentre, in regime invernale, è importante che la temperatura di mandata sia almeno di 19°C e comunque non più di 3°C inferiore alla temperatura interna. Ancora, un sensore per i carichi solari può rivelarsi utile per incrementare all'occorrenza il tasso di rinnovo prevenendo i fenomeni di surriscaldamento.

1.4.5) Rumore

Dal punto di vista normativo, il rumore prodotto dagli impianti VMC è trattato nelle norme tecniche UNI 11367 [60] e UNI EN 16798-1 [7]: la prima definisce i limiti di rumorosità degli impianti di ventilazione e condizionamento, la seconda prescrive dei valori massimi da rispettare in termini di livelli di pressione sonora continua equivalente ponderato A e normalizzata rispetto al tempo di riverberazione della stanza ($L_{Aeq,nT}$), per tenere conto della relativa capacità di assorbimento del rumore (Tabella 1.20):

Tabella 1.20. Valori massimi in termini di $L_{Aeq,nT}$ per sorgenti continue in dB(A) secondo UNI EN 16798-1

Tipologia ambiente	Categoria di comfort secondo UNI EN ISO 7730		
	I	II	III
Aule	≤30	≤34	≤38
Palestre	≤35	≤40	≤45
Bagni	≤35	≤45	≤55
Corridoi	≤35	≤40	≤45

La norma permette di eccedere i suddetti limiti per brevi periodi nell'ipotesi in cui gli occupanti possano controllare il funzionamento dell'impianto o delle finestre, con incrementi compresi tra 5 e 10 dB(A).

Inoltre, in ottemperanza alle prescrizioni legislative sancite dai Criteri Ambientali Minimi [8], si raccomanda di rispettare i seguenti valori limite relativi alla rumorosità immessa dagli impianti di ventilazione in locali adibiti ad attività scolastiche:

- livello sonoro massimo in ambienti diversi da quelli di installazione non superiore a 28 dB(A) per servizi a funzionamento continuo;
- livello sonoro massimo in ambienti diversi da quelli di installazione non superiore a 34 dB(A) per servizi a funzionamento discontinuo

Ancora, in conformità ai CAM, per preservare il comfort acustico negli ambienti scolastici è richiesto il raggiungimento dei valori di riferimento riportati nella UNI 11532-2 [127] in termini di tempo di riverberazione e STI per l'acustica interna. Nella medesima norma sono anche riportati i livelli massimi da rispettare come rumore globale indotto dagli impianti e dai componenti d'impianto a funzionamento continuo nello stesso ambiente in cui si origina, espressi mediante il descrittore $L_{ic,int}$ e le curve NC.

Le misure di livello sonoro devono essere eseguite nell'ambiente in cui il livello di rumore è più elevato. Inoltre, è importante che il dato fonometrico rilevato venga depurato dal rumore residuo, in modo da ottenere solamente il valore associato alla tecnologia analizzata. Per ulteriori approfondimenti si rimanda alla norma UNI 11367.

Il **rumore** derivante dall'esercizio di un impianto VMC è associato a delle **sorgenti di generazione** e a dei **cammini di propagazione** che intercorrono tra le stesse e gli ambienti riceventi [94]. In riferimento alla Figura 1.49, si evidenziano le seguenti sorgenti:

- Ventilatore;**
- Sorgenti puntuali di rumore aerodinamico** (serrande di sezionamento e regolazione, curve e gomiti, giunzioni e stacchi, variazioni di sezione, griglie e diffusori, attenuatori, ecc..) lungo i **condotti;**
- Vibrazione dei condotti** rettilinei.

Alcune indicazioni relative al contenimento del rumore prodotto dalle sorgenti puntuali sono state fornite nei capitoli precedenti. Altre verranno invece esplorate nei paragrafi successivi.

I principali cammini di propagazione possono essere così descritti:

- 1) Cammini di propagazione del rumore per via aerea attraverso pareti e solai che delimitano la centrale;
- 2) Cammini di propagazione del rumore per via strutturale attraverso i solai e le strutture murarie direttamente collegate ai componenti d'impianto;
- 3) Cammini di propagazione per via aerea attraverso le pareti dei condotti (*break-out*);
- 4) Cammini di propagazione del rumore lungo i canali e rumorosità immessa nell'ambiente direttamente attraverso le bocchette di mandata e ripresa dell'aria.

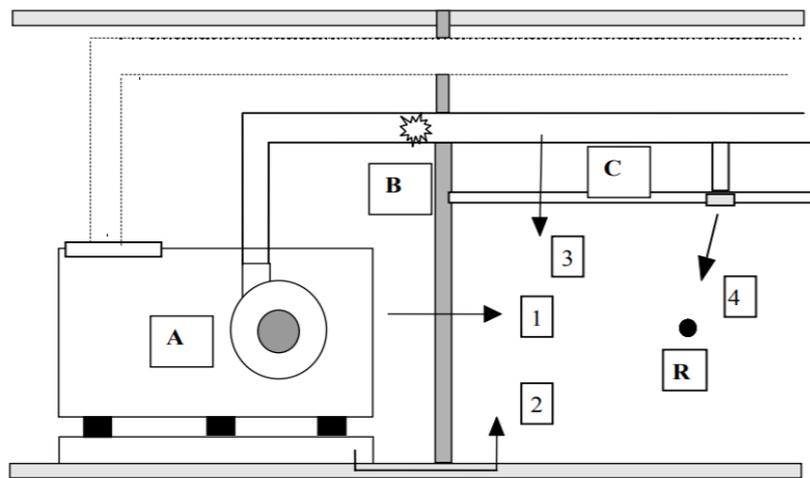


Figura 1.49. Possibili sorgenti e cammini di propagazione del rumore di un impianto di ventilazione e condizionamento [94]

La rumorosità indotta dai primi tre cammini di propagazione può essere limitata da un adeguato fonoisolamento delle strutture murarie, dall'uso di materiali resilienti che smorzano le vibrazioni di strutture direttamente sollecitate, dall'installazione di silenziatori e dall'impiego di opportune controsoffittature. Inoltre, si raccomanda di studiare attentamente il percorso dei condotti in sede di progetto in modo che essi non attraversino in serie gli ambienti, così come descritto in Figura 1.50.

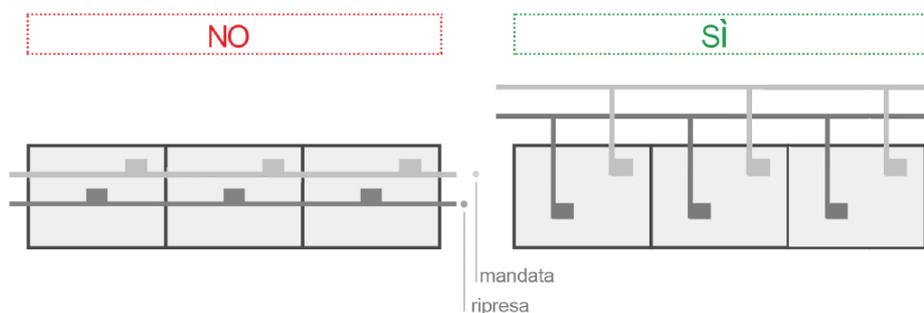


Figura 1.50. Disposizione corretta (a destra) ed errata (a sinistra) in relazione della rumorosità trasmessa [95]

Nonostante tutti questi accorgimenti, gli ambienti riceventi saranno comunque interessati dal quarto cammino di propagazione, ovvero dalla propagazione del rumore lungo i canali. Da qui la necessità di analizzare in dettaglio i meccanismi di generazione e diffusione del rumore, affinché l'impianto di ventilazione venga progettato non solo a salvaguardia dell'IAQ, ma, più in generale, dell'IEQ. Infatti, il controllo dell'impatto acustico di un sistema di distribuzione dell'aria viene effettuato con un approccio olistico che include la selezione, il dimensionamento e il posizionamento dei vari dispositivi, così come la scelta delle condizioni di esercizio del sistema stesso.

La prima sorgente da considerare è rappresentata dai ventilatori. Dal punto di vista meccanico, il rumore di un ventilatore è causato dalla radiazione strutturale della cassa e di altre parti connesse, conseguente alla sollecitazione di forze fluttuanti legate alle parti rotanti e alla turbolenza del flusso d'aria. Un secondo contributo consiste nel rumore aerodinamico, prodotto dagli impulsi periodici che ciascuna pala della girante conferisce all'aria in prossimità e dai vortici che si trovano nella scia turbolenta delle pale.

Per limitare l'incidenza di tali effetti, si suggeriscono le seguenti azioni:

- far lavorare il ventilatore in corrispondenza del punto di massima efficienza con il carico di progetto;
- evitare condizioni di stallo, le quali, soprattutto con ventilatori assiali e con quelli centrifughi a pale curve in avanti, possono incrementare il rumore di 8-10 dB rispetto al funzionamento nel punto ottimale;
- far sì che il flusso in corrispondenza delle sezioni di ingresso e di uscita sia più regolare possibile, in modo da minimizzare la generazione di turbolenza. A tal fine, filtri, curve, allargamenti e restringimenti non dovrebbero essere collocati a distanze minori di 5-6 diametri equivalenti rispetto alla sezione di mandata del ventilatore;
- posizionare le bocche di ingresso e/o uscita delle macchine lontano dalle pareti;
- collegare i condotti alle macchine mediante raccordi flessibili possibilmente non corrugati, che danno luogo ad una minore trasmissione strutturale;
- prevedere l'uso di sospensioni elastiche per isolare la macchina e ridurre la propagazione delle vibrazioni;
- dimensionare correttamente il sistema, in quanto, in caso contrario, si aggraverebbero i problemi di rumorosità a bassa frequenza;
- contenere il più possibile le perdite di carico e le velocità nella rete di distribuzione e di trattamento dell'aria. Infatti, il rumore generato aumenta con il quadrato della pressione statica di targa;
- adottare dei ventilatori a velocità variabile, caratterizzati da livelli di potenza sonora significativamente più bassi rispetto alle altre macchine. Si preferiscano, inoltre, ventilatori con alto numero di pale.

La rete dei condotti di areazione rappresenta una sorgente distribuita di rumore, indicato con il termine di rumore di *break-out*. La sua origine può essere associata a una delle seguenti cause:

- rumore interno dovuto all'esercizio del ventilatore, che si trasmette all'esterno attraverso le pareti dei condotti;
- rumore aerodinamico generato da corpi interagenti con la corrente, che si trasmette all'esterno attraverso le pareti dei condotti;
- vibrazioni delle pareti dei condotti a causa della turbolenza del flusso.

Un fenomeno di *break-out* assolutamente da evitare è quello legato a strutture vorticose di dimensioni paragonabili alla dimensione lineare trasversale di un condotto rettangolare. Ad esse sono infatti associate delle distribuzioni di pressione che "rullano" la lamiera del canale producendo una vibrazione a frequenza molto bassa ed eventualmente a frequenze armoniche di questa (*duct buffeting*). Questo fenomeno diventa ancor più grave in corrispondenza di variazioni di sezione del condotto, di gomiti o distacchi, in quanto le velocità tangenziali dei vortici acquisiscono forti componenti normali alle pareti del condotto. Le vibrazioni, a loro volta, si propagano nell'aria esterna e danno luogo a delle fluttuazioni della pressione che, interagendo con strutture leggere, come vetrate, controsoffittature e altri elementi laschi, producono tintinnii e ronzii estremamente fastidiosi. Nel caso in cui il rumore di *break-out* rappresentasse un problema, è possibile incrementare il fonoisolamento del canale realizzando una fodera esterna di lana di vetro o poliuretano espanso a celle aperte con uno spessore di 5 - 10 cm. Questa, a sua volta, sarà protetta da un involucro esterno in lamiera o con lastre di gesso [94].

Normalmente, per porre rimedio ai problemi derivanti da un'eccessiva rumorosità, si utilizzano dei condotti provvisti di isolamento acustico interno con spessore compreso tra 2 e 5 cm. Questo, essendo costituito da materiale fibroso, è soggetto all'accumulo di polveri e alla ritenzione di umidità, e alla conseguente crescita di muffa. Un ulteriore problema è legato alla possibile contaminazione dell'aria di passaggio da parte di batteri e funghi ivi accumulati e alla perdita di alcune fibre costituenti lo strato isolante stesso. Quest'ultimo, in particolare, non deve appartenere all'elenco delle sostanze pericolose per l'uomo o per l'ambiente, nel rispetto del Regolamento (CE) n. 1272/2008 [96]. A causa di tutte queste problematiche, si sconsiglia fortemente l'impiego dei canali isolati acusticamente, a meno che questi non siano caratterizzati da un doppio rivestimento in lamiera. In tal caso, infatti, l'isolante interposto tra le due lamiere non entrerebbe in contatto con il flusso d'aria, preservandone la qualità. Ciò, però, comporta dei maggiori costi d'investimento.

In alternativa, anziché rivestire i canali esistenti, spesso si preferisce installare dei silenziatori in punti specifici della rete aeraulica. Sebbene tali dispositivi siano comunque costituiti da pannelli di materiale fonoassorbente, in questi casi è possibile gestire con più attenzione le procedure di pulizia atte ad evitare l'accumulo di polveri e la formazione di muffa. Inoltre, si raccomanda di verificare la totale assenza di gap o cavità nel materiale e di proteggerne in modo opportuno gli angoli e le zone più esposte al flusso di aria incidente.

I silenziatori possono essere suddivisi in due tipologie principali:

- **silenzianti cilindrici:** sono molto utili nel campo delle medie frequenze e possono essere provvisti o meno di un elemento fonoassorbente aggiuntivo montato al centro (Figura 1.51 a destra);
- **silenzianti a setti:** performano bene alle basse frequenze, soprattutto se caratterizzati da lunghezze elevate e da setti molto spessi (Figura 1.51 a sinistra).

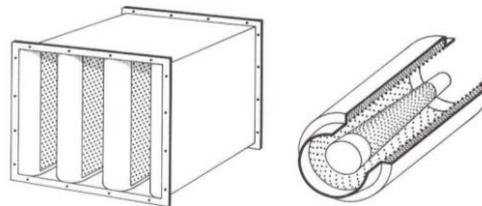


Figura 1.51. Silenziatore a setti (a sinistra) e cilindrico (a destra)

Il posizionamento relativo di macchine e silenzianti incide sulla rumorosità finale trasmessa in ambiente. In particolare, se l'impianto si trova in un locale tecnico diverso da quello occupato, si raccomanda di collocare il silenziatore immediatamente a monte della serranda tagliafuoco posta in corrispondenza della parete divisoria. In questo modo viene attenuato sia il rumore proveniente dal ventilatore sia quello che si propaga lungo i canali investiti dalle vibrazioni della centrale di ventilazione [97].

In Figura 1.52 si riportano alcuni accorgimenti da adottare nella realizzazione delle condotte e nel posizionamento dei silenzianti al fine di ridurre la trasmissione e l'auto-generazione del rumore negli ambienti:

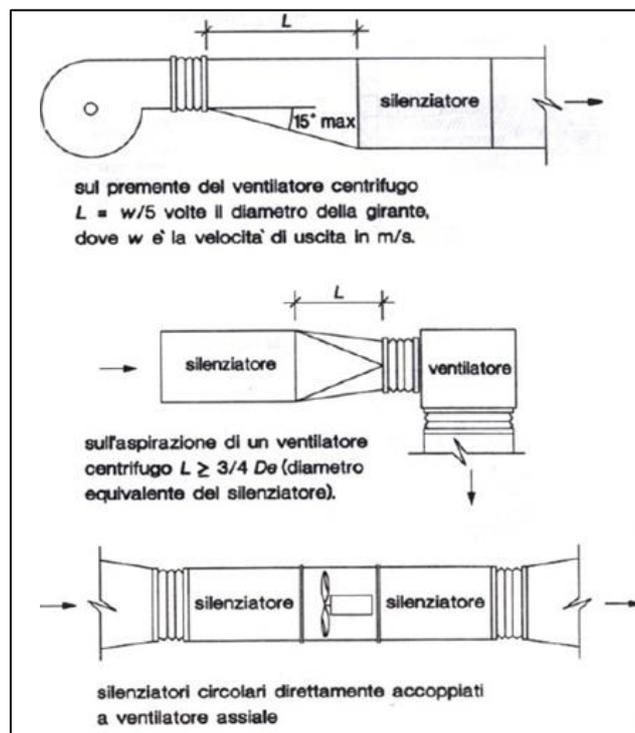


Figura 1.52. Linee guida per la realizzazione dei canali e l'installazione dei silenzianti [97]

Si presti attenzione anche alla propagazione del rumore nell'ambiente esterno: per evitare lamentele da parte di terzi è bene prevedere opportune strategie di attenuazione acustica, installando se necessario dei silenziatori in corrispondenza delle bocchette di espulsione dell'aria esausta. Per ulteriori approfondimenti circa la trasmissione del rumore interno all'esterno si rimanda alla norma UNI EN ISO 12354-4 [98].

Indipendentemente dai metodi e dai dispositivi utilizzati per ridurre la rumorosità prodotta dal sistema di ventilazione, è importante che in fase di acquisto dell'impianto/macchina sia possibile consultare i seguenti dati sull'emissione del rumore:

- livelli dichiarati di pressione sonora nei posti di lavoro e livello massimo di picco ponderato;
- livello dichiarato di potenza sonora ponderato;
- riferimento alla norma tecnica oppure descrizione completa del metodo di misurazione adottato per la determinazione dei dati dell'emissione di rumore dichiarati.

1.4.6) Gestione e manutenzione degli impianti di ventilazione

Una cattiva manutenzione degli impianti di ventilazione si ripercuote negativamente sull'IAQ complessiva degli ambienti occupati: in molti casi, la presenza di agenti patogeni diffusi può essere ricondotta all'esercizio di filtri carichi di scorie e polveri, le quali vengono messe in circolazione attraverso le canalizzazioni di distribuzione dell'aria. Oltre a serie implicazioni igienico-sanitarie, ciò può determinare maggiori costi di funzionamento ed un incremento dei rischi di incendio e corrosione. Per questo motivo, i sistemi di condizionamento e ventilazione devono essere progettati, costruiti e installati in modo tale da **consentire la pulizia di tutte le superfici interne e di tutti i componenti**, in conformità alle disposizioni della UNI EN 12097 [99] e UNI EN 16798-17 [100]. A tale proposito, devono essere effettuate **ispezioni tecniche e manutentive regolari insieme a frequenti controlli igienici da parte di personale specializzato**, in conformità alle specifiche contenute nelle "Linee guida per la definizione di protocolli tecnici di manutenzione predittiva sugli impianti di climatizzazione" [101].

Le superfici esposte al flusso d'aria, in particolar modo **le condotte di ventilazione**, possono essere soggette alla **colonizzazione da parte di microorganismi, come funghi e batteri**. La crescita di questi agenti microbici avviene principalmente in presenza di polvere e/o in ambienti caratterizzati dalla presenza di ossigeno, umidità e temperature comprese tra 15 e 25°C. Sebbene alcuni microorganismi siano comunque in grado di crescere su superfici pulite e con aria secca, la rimozione di polvere e il controllo dell'umidità rappresentano i due fattori chiave per minimizzare l'insorgenza di colonizzazione microbiologica. Nel caso in cui questa si manifestasse comunque in punti dell'impianto difficilmente accessibili ai tradizionali metodi di pulizia meccanica, è possibile utilizzare delle sostanze biocide, previa verifica della relativa efficacia e assenza di tossicità. La sanificazione condotta mediante le suddette sostanze non è però una pratica desiderabile: i biocidi sono per loro natura degli agenti chimici potenzialmente pericolosi, che introducono umidità nel sistema di ventilazione e quindi terreno fertile per la crescita di ulteriori funghi e batteri. Ne deriva la necessità di un controllo accurato da effettuarsi al termine della sanificazione per verificare che nessuna sostanza tossica e/o nociva, biologicamente pericolosa o emanante odori possa essere introdotta nell'aria di rinnovo.

Il primo controllo, previsto anche dai CAM, dovrebbe avvenire prima della messa in servizio dell'impianto secondo le disposizioni della UNI EN 15780 [102], al fine di accertare che lo stesso sia stato posto in opera pulito, ovvero che vi sia la totale assenza di detriti e polveri di cantiere. Tale controllo, così come tutte le successive ispezioni, devono essere riportate su apposito registro custodito dal manutentore o dal responsabile della sicurezza.

Le **ispezioni periodiche** dovrebbero includere le seguenti operazioni:

- visita di ispezione dell'UTA e degli ambienti da questa serviti per rilevare eventuali danneggiamenti, da effettuarsi insieme al responsabile della sicurezza e a un rappresentante del personale;
- registrazione dei parametri microclimatici in punti significativi del sistema di condizionamento dell'aria e degli ambienti serviti;
- ispezione delle condizioni igieniche inclusi specifici test su filtri, umidificatori e batterie di scambio termico;
- rapporto scritto sui risultati dell'ispezione insieme alle eventuali raccomandazioni richieste per le misure igieniche necessarie.

Ancora, le **ispezioni igieniche** dovrebbero avvenire con le seguenti scadenze:

- ogni anno nel caso di sistemi con umidificatori ad acqua;
- ogni due anni nel caso di sistemi con umidificatori a vapore;
- ogni tre anni per sistemi senza umidificatori d'aria.

Le **ispezioni e le successive operazioni di pulizia devono essere effettuate da personale specializzato** che abbia una completa e appropriata formazione. In particolare, i tecnici incaricati dei lavori di manutenzione devono avere una formazione almeno di categoria B, mentre per i controlli e incarichi semplici, come la sostituzione dei filtri, è richiesta solamente una formazione supplementare della stessa categoria; viceversa, le ispezioni necessitano di una formazione di categoria A. Per ulteriori indicazioni relative ai requisiti del personale e ai criteri da soddisfare si rimanda alle già citate Linee Guida [101].

Si è già osservato come gli accumuli di polvere rappresentino una delle principali fonti di inquinamento microbiologico. Analogamente, un qualsiasi altro substrato ricco di umidità può fungere da terreno di coltura per i diversi microorganismi in presenza di idonee condizioni termo-igrometriche. Per questo motivo, vengono di seguito proposti alcuni accorgimenti volti ad evitare o minimizzare il deposito di polveri nei componenti d'impianto, oltre all'esplorazione delle principali tecniche con cui effettuare la pulizia. Successivamente verrà affrontato il tema della contaminazione microbiologica dell'aria interna e/o delle superfici dei canali.

Si vuole sin da subito precisare come il **controllo dell'umidità**, soprattutto quella associata ad eventi "indesiderati", rappresenti un elemento chiave per prevenire la crescita microbica nei sistemi di ventilazione. Ad esempio, non dovrebbero mai verificarsi le seguenti condizioni:

- temperatura superficiale interna dei canali inferiore alla temperatura di rugiada del flusso d'aria;
- ingresso di pioggia;
- residui dei processi di pulizia che si servono di acqua o vapore.

1.4.6.1) Polvere

I depositi di polvere nelle condotte, così come l'intasamento delle maglie dei filtri, possono dar luogo alla contaminazione dell'aria immessa a causa del rilascio di agenti chimici, come i VOC, e di agenti microbiologici come spore, funghi e batteri. Di conseguenza, per assicurare la completa pulizia della rete di distribuzione, si richiede di prestare **attenzione alle fasi di stoccaggio, installazione ed esercizio del sistema di ventilazione**. Ad esempio, è importante che tutti i componenti vengano trasportati e conservati in un luogo asciutto e pulito e che qualsiasi traccia di grasso o di altra sostanza venga rimossa per prevenire la crescita di agenti microbiologici. Dopodiché, durante l'installazione, si consiglia l'impiego di teli con cui rivestire le estremità libere delle condotte per evitare l'ingresso di polvere e detriti.

Nonostante tutte queste precauzioni, è comunque richiesta un'ispezione dello stato dell'impianto da effettuarsi prima della messa in servizio dello stesso. Questa dovrebbe comprendere tutti i componenti d'impianto, a partire dalla presa d'aria esterna fino ai canali di espulsione e di ricircolo, e può essere condotta con l'ausilio di videocamere, endoscopi e robot con possibilità di ripresa.

Nel caso in cui venga riscontrata la necessità di pulizia, questa andrebbe effettuata in conformità alla UNI EN 15780. La norma, in particolare, prevede tre diversi livelli di pulizia: basso, medio e alto. Il livello medio è adatto ai locali in cui vengono svolte le normali attività di insegnamento, come le aule scolastiche, mentre nei laboratori si suggerisce di adottare il livello alto. Nel rispetto delle Linee Guida [101], si considerino gli intervalli di ispezione (in mesi) espressi in Tabella 1.21:

Tabella 1.21. Intervalli di ispezione in mesi in funzione della classe di pulizia e del dispositivo considerato [102]

Classe di pulizia	UTA	filtri ^a	umidificatori	condotte	terminali
Bassa	24	12	12	48	48
Media	12	12	6	24	24
Alta	12	6	6	12	12

a) i filtri devono essere ispezionati e mantenuti secondo le raccomandazioni del produttore, assumendo i valori in tabella come valori minimi

Dunque, l'analisi dello stato di pulizia ha inizio con un'ispezione visiva, durante la quale è possibile confrontare la situazione rilevata con la scala di pulizia proposta da REHVA, che consiste in sei illustrazioni raffiguranti diversi accumuli di polvere come mostrato in Figura 1.53 [103]:

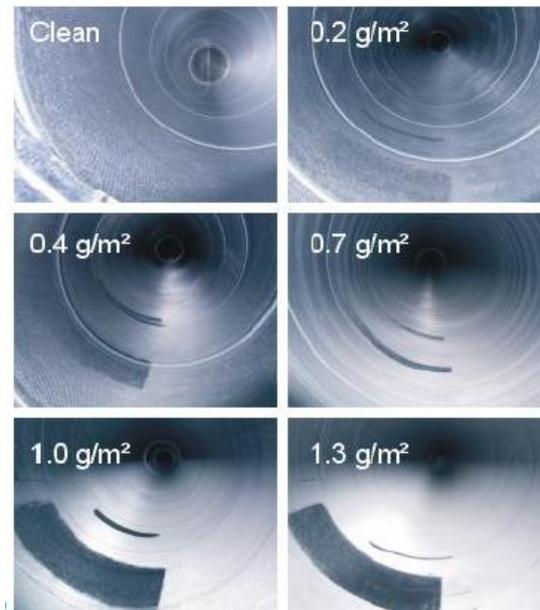


Figura 1.53. Scala di riferimento per l'ispezione visiva delle condotte di ventilazione [103]

Se il componente è pulito, è sufficiente riportarne l'esito nell'apposito registro; viceversa, se è visibilmente sporco, è necessario procedere con le operazioni di pulizia.

Nel caso in cui i risultati dell'ispezione non siano chiari e/o soddisfacenti, si suggerisce di utilizzare un metodo di valutazione più oggettivo, basato sulla raccolta e sulla misura della polvere depositatasi su un'area nota della superficie interna del tubo. Normalmente, viene effettuato un campionamento nelle condizioni di sottovuoto mediante raschiatura della polvere e analisi della contaminazione delle superfici attraverso opportune tecniche. I limiti da rispettare in termini di livelli accettabili di pulizia in funzione delle classi di qualità sono presentati in Tabella 1.22, sia per le condotte di immissione che per quelle secondarie o di ricircolo:

Tabella 1.22. Livelli accettabili di pulizia nei canali aeraulici [102]

Classe di qualità di pulizia	Livelli accettabili condotte di immissione [g/m ²]	Livelli accettabili condotte di ricircolo o secondarie [g/m ²]
Bassa	< 4.5	< 6.0
Media	< 3.0	< 4.5
Alta	< 0.6	< 3.0

Ancora, per le condotte di estrazione il livello massimo accettabile corrisponde a 9.0 g/m².

Si sottolinea come i valori di Tabella 1.22 relativi alla classe media siano poco cautelativi e non del tutto conformi alla normativa vigente: infatti, le Linee Guida [101] stabiliscono che il limite per la contaminazione ammissibile nei condotti d'aria sia pari a 1 g/m². Di conseguenza, nell'ipotesi di superamento del suddetto valore, è necessario procedere con le operazioni di pulizia, come specificato dal diagramma di Figura 1.54:

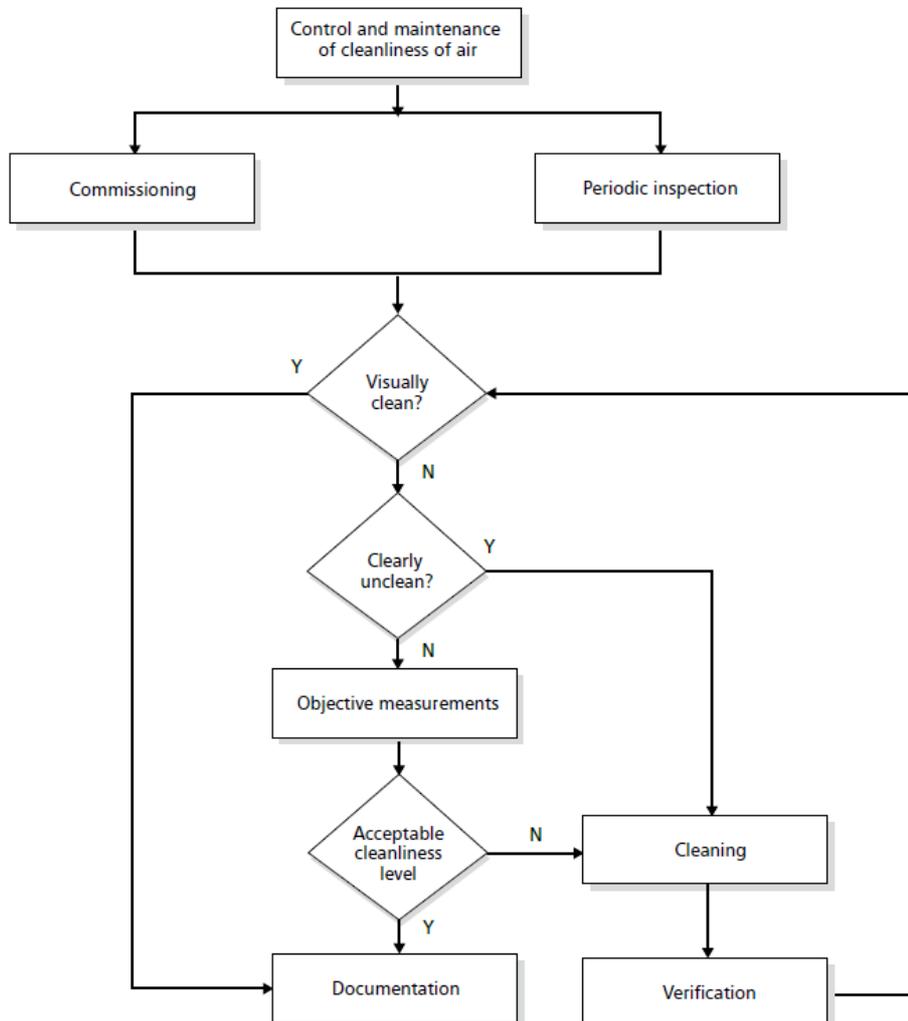


Figura 1.54. Schema operativo riguardante le operazioni di pulizia e manutenzione [35]

Di seguito vengono elencate le **principali tecniche di pulizia**:

- raschiamento meccanico in condizioni di sottovuoto;
- iniezione di vapore;
- aria compressa.

Si intuisce, dunque, come alcuni di questi metodi operino a secco, mentre altri implicino la presenza di acqua/vapore. In generale, i metodi “a secco” sono sempre da preferire rispetto a quelli “bagnanti”, in quanto la presenza di umidità comporta un potenziale di crescita microbica. I primi sono adatti ai sistemi di immissione ed estrazione dell’aria, mentre i secondi trovano applicazione nelle cucine o negli ambienti in cui l’aria di ripresa contiene fumi o altre impurità. Inoltre, l’utilizzo dell’acqua nelle operazioni di pulizia è consentito solo se le reti di distribuzione sono perfettamente lisce, a tenuta e sufficientemente inclinate per permettere l’evacuazione dei residui di fluido.

È ben noto che, prima della messa in servizio dell'impianto, è sempre richiesto un controllo del livello di pulizia delle condotte. In questo caso, i valori limite raccomandati sono di gran lunga più stringenti: ad esempio per la classe media non bisogna eccedere 0.6 g/m^2 per le condotte di immissione, di ricircolo o secondarie e 1.8 g/m^2 per le condotte di estrazione. Infine, dopo le operazioni di pulizia, bisogna verificare che la quantità di polvere in tutte le condotte sia inferiore a 0.3 g/m^2 . Ancora, si consiglia di constatare, assieme al personale incaricato, che tutte le serrande e i dispositivi di controllo si trovino nella medesima posizione; in caso contrario, il sistema potrebbe richiedere un processo di bilanciamento.

Ai fini di una corretta manutenzione, è importante che il sistema di distribuzione dell'aria venga progettato e installato in modo che **sia possibile accedere con facilità alle superfici interne dei canali e ai componenti d'impianto**. A tale proposito, la norma di riferimento è la già citata UNI EN 12097, in cui vengono specificate le dimensioni minime raccomandate dei pannelli di accesso nelle condotte circolari e rettangolari e il relativo posizionamento. I componenti, tra cui serrande e sensori, devono essere installati affinché possano essere puliti in situ o rimossi momentaneamente. In mancanza di tali condizioni, l'accesso dovrebbe essere garantito da entrambi i lati senza che cavi elettrici e altri elementi rappresentino un ostacolo. Inoltre, è necessario riservare uno spazio adeguato attorno ai canali per agevolare il lavoro del personale durante le operazioni di pulizia e manutenzione. Queste prescrizioni, discretizzate in funzione della geometria, sono rappresentate in Figura 1.55 per condotte orizzontali (a sinistra) e per montanti verticali (a destra), sia isolati che non.

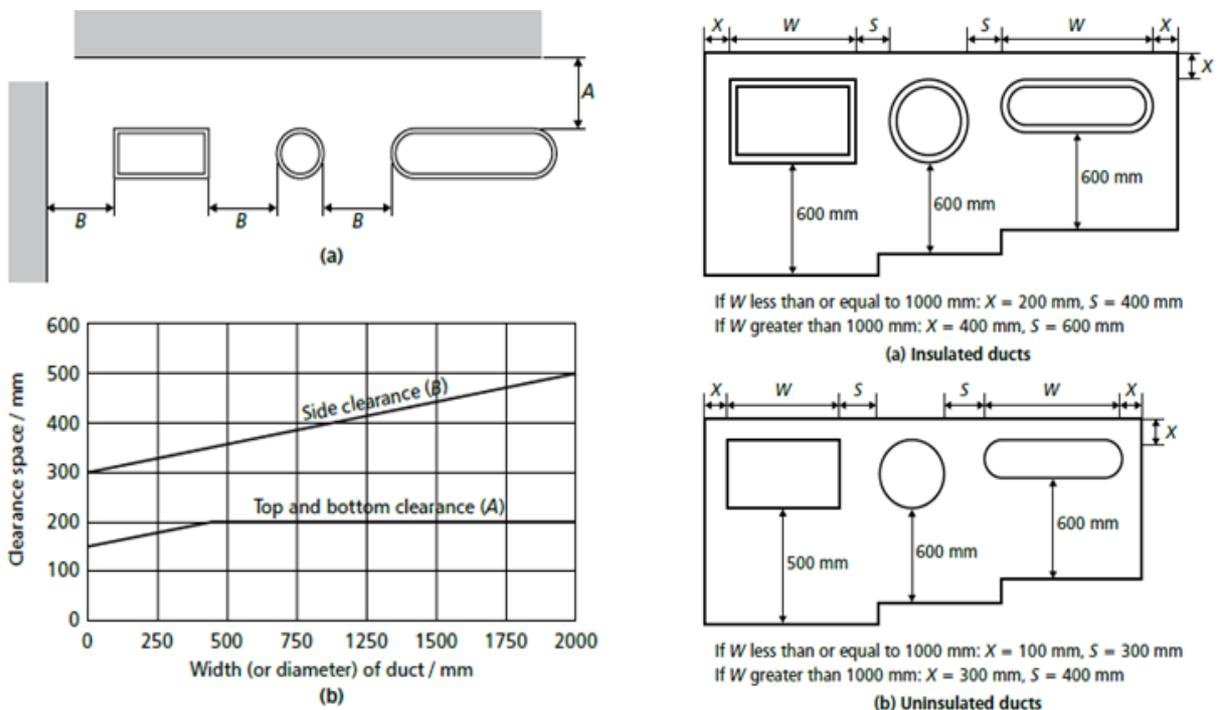


Figura 1.55. Spazi minimi raccomandati per condotte orizzontali (a sinistra) e per montanti verticali (a destra) [35]

I valori proposti possono essere ridotti all'occorrenza, previa verifica dell'integrità e della corretta esecuzione delle giunzioni, dell'isolamento e della barriera al vapore.

Di solito, la polvere si accumula nella parte inferiore dei canali, in quantità tanto maggiore quanto più elevata è la distanza dall'UTA. I depositi, inoltre, tendono a formarsi nei punti in cui si ha rallentamento del flusso, ovvero in corrispondenza dei filtri, delle batterie di scambio, dei silenziatori, delle serrande, delle curve e delle variazioni di sezione. Lo stato di questi elementi è quindi un buon indicatore del bisogno di pulizia e maggiori sforzi andrebbero destinati proprio a questi componenti, per garantirne una perfetta manutenzione. A tale proposito si rimanda alle Linee Guida [101], che propongono una descrizione molto dettagliata delle operazioni di pulizia da effettuare in funzione dell'elemento considerato.

Si conviene però sull'importanza di una **corretta gestione dei filtri** nel preservare una buona qualità dell'aria interna. Come già osservato al paragrafo 1.4.1.3, questi devono essere ispezionati a intervalli regolari e durante tali ispezioni devono essere verificati e registrati separatamente i seguenti parametri:

- differenza di pressione tra monte e valle del filtro;
- tempo di esercizio;
- perdite di materiale filtrante e tenuta del filtro;
- corrispondenza del valore di efficienza previsto in progetto.

I filtri per l'aria devono essere sostituiti nel caso in cui si verifichi un'evidente contaminazione, una perdita, un calo di efficienza, oppure una volta raggiunta la differenza di pressione finale ammissibile, che può essere misurata mediante dei manometri posizionati in corrispondenza di ciascuna sezione filtrante. Nell'installazione di nuovi filtri, è necessario assicurare la tenuta all'aria della struttura portante e impedire che la polvere residua si disperda a valle degli stessi.

1.4.6.2) Agenti microbiologici

I livelli microbiologici presenti sulle superfici dei canali e dei vari componenti possono essere determinati mediante opportune tecniche di misura, per le quali si rimanda alle norme di settore. Infatti, come sancito dai CAM [8], il piano di manutenzione generale deve prevedere un programma di monitoraggio e controllo della qualità dell'aria interna all'edificio, al fine di individuarne le eventuali criticità, anche in relazione alla concentrazione di agenti patogeni, tra cui funghi, batteri, acari e pollini. È auspicabile che i valori misurati in unità formanti colonia (cfu) per metro cubo di aria rispettino la categoria più stringente (low) riportata in Tabella 1.23:

Tabella 1.23. *Classificazione delle concentrazioni in aria di agenti microbiologici [104]*

Categoria	cfu/m ³
Bassa	< 100
Media	≥ 100 ma < 1000
Alta	≥ 1000

Se il contenuto microbiologico dell'aria indica la necessità di un'analisi più approfondita, bisognerà procedere con la stessa e con la valutazione della contaminazione superficiale delle condotte da parte di funghi e batteri. Ciò consente di capire se la causa di tale problema sia rappresentata dalla cattiva manutenzione della rete di distribuzione oppure da altre fonti interne o esterne. In relazione alla

contaminazione delle superfici dei canali, sarebbe opportuno rispettare la medesima categoria (low) secondo i limiti di Tabella 1.24:

Tabella 1.24. *Classificazione delle concentrazioni superficiali di agenti microbiologici [104]*

Categoria	cfu/10·cm ²
Bassa	< 10
Media	≥ 10 ma < 20
Alta	≥ 20

A valle dei processi di campionamento e misura è possibile interrogarsi sulle future azioni da intraprendere secondo lo schema di Tabella 1.25:

Tabella 1.25. *Azioni di pulizia e manutenzione da intraprendere a seconda della concentrazione di agenti patogeni in aria e sulle superfici*

Stato aria	Stato superfici	Commenti e azioni
Inaccettabile	Inaccettabile	Poiché si ha contaminazione sia nei canali che nel flusso di aria, si raccomanda di effettuare la sanificazione il prima possibile
Accettabile	Inaccettabile	Data l'elevata probabilità che l'aria venga contaminata, si consiglia di monitorarne la qualità e di programmare la pulizia dei canali
Inaccettabile	Accettabile	Poiché è improbabile che le condotte siano la causa della contaminazione, è necessario individuare le sorgenti microbiche, come zone di muffa o moquette sporche
Accettabile	Accettabile	Il sistema è pulito e non richiede alcuna azione riparatoria

Come già accennato, la sanificazione prevede l'utilizzo di sostanze biocide per le quali è richiesta grande attenzione. Nel Protocollo AiCARR, a cui si rimanda, vengono approfondite le modalità di intervento sui singoli componenti d'impianto e i prodotti migliori da utilizzare [105].

Nel caso in cui la presenza e la diffusione di agenti patogeni possa ripresentarsi anche a valle di interventi di pulizia e sanificazione, si invita all'installazione di lampade UVGI all'interno degli impianti di ventilazione, o di altre tecnologie volte a inibire la crescita microbica. Queste soluzioni verranno esplorate in dettaglio nel paragrafo seguente.

1.4.7) Sistemi di sanificazione da integrare nella VMC

Per migliorare il livello di IAQ in ambienti caratterizzati da elevate concentrazioni di agenti patogeni, è possibile **combinare il ricambio dell'aria alla sanificazione** della stessa, indicata in letteratura anche come "*air cleaning*". Si vuole sin da subito precisare come **tale tecnologia non abbia alcun effetto sulle concentrazioni interne di CO₂ e pertanto la portata di rinnovo elaborata dall'impianto deve rimanere la stessa** indipendentemente dalla presenza o meno della sanificazione.

I dispositivi di sanificazione (*air cleaners*) si distinguono in funzione dei processi a cui danno vita e agli inquinanti verso i quali tali processi si dimostrano efficaci: ad esempio, alcuni abbattano i VOC, altri le polveri e altri ancora gli agenti patogeni. Esistono però tecnologie più avanzate in grado di abbattere tutti

i suddetti contaminanti: è il caso degli **ionizzatori a plasma freddo** o delle **lampade a irradiazione germicida ultravioletta**, di cui si parlerà più diffusamente in seguito. Viceversa, non verranno menzionati i filtri HEPA e ULPA, in quanto realizzano un processo di filtrazione ad altissima efficienza, intrappolando gli agenti patogeni ma senza eliminarli realmente. Di conseguenza, le scorie prodotte possono a loro volta rappresentare un terreno di coltura per i microrganismi, rendendo necessaria una frequente pulizia o sostituzione dei filtri.

Sebbene siano nati per il settore residenziale, le tecnologie di sanificazione trovano applicazione anche nel terziario e negli ambienti di lavoro; qui, però, le classiche versioni “*stand-alone*” utilizzate in ambito domestico hanno un’efficacia molto limitata, a causa delle grandi portate di rinnovo che si troverebbero a gestire. Di conseguenza, in presenza della VMC, si preferisce installare i sanificatori direttamente all’interno dell’impianto, affinché questi siano in grado di trattare tutta la portata elaborata dallo stesso.

In generale, è importante che le tecnologie impiegate non diano luogo, come effetto secondario, al rilascio di composti chimici pericolosi per la salute delle persone. Si raccomanda pertanto di affidarsi a dispositivi opportunamente testati e certificati secondo gli standard di settore.

Di seguito, viene fornita una breve descrizione delle principali **tecnologie di sanificazione da poter installare nei sistemi VMC** [75]:

- i **precipitatori elettrostatici** basano il loro funzionamento su campi elettrici che agiscono direttamente sulle particelle e sui microrganismi presenti nell’aria. Garantiscono l’abbattimento di particelle fino a 0.01 µm, ma necessitano di continua pulizia, pena un brusco calo dell’efficienza;
- le **lampade a irradiazione germicida ultravioletta (UVGI)** inducono un processo di fotocatalisi, che, grazie ad una doppia reazione di ossido-riduzione, è in grado di abbattere i microrganismi distruggendone il DNA. Questi sistemi sono efficaci contro qualsiasi tipo di batterio e di fungo, così come nei confronti di spore e virus che normalmente si diffondono in aria;
- gli **ionizzatori a plasma freddo (NTP)** caricano elettricamente le particelle d’aria a temperatura ambiente trasformandole in un gas ionizzato, che disaggrega sia i composti organici volatili che le membrane proteiche di virus e batteri;
- gli **ozonizzatori** iniettano ozono all’interno degli ambienti occupati, in quanto esso è in grado di catturare per aggregazione le molecole e poi di disgregarle. È necessario prestare grande attenzione alla quantità di ozono immessa, poiché oltre determinate soglie, può risultare dannoso.

Tra tutte queste tecnologie, le lampade UVGI e gli ionizzatori NTP hanno dimostrato maggiore efficacia nella lotta contro la crescita e la diffusione degli agenti patogeni. Non di meno, sfruttano processi naturali, senza l’apporto di sostanze disinfettanti o igienizzanti o di materiali di consumo. L’unico inconveniente è rappresentato, in entrambi i casi, dall’accumulo di residuo inerte che deve essere opportunamente asportato ed eliminato.

1.4.7.1) Lampade UVGI

Le lampade UVGI vengono di solito installate nell'UTA, per far sì che l'irradiazione investa le superfici e/o il flusso di aria elaborata, distruggendo il DNA degli agenti microbici, tra cui virus, batteri e funghi. La lunghezza d'onda ottimale per l'inattivazione dei microrganismi è di 265 nm, mentre l'effetto germicida diminuisce rapidamente altrove [107]. Si sottolinea come la potenza irradiata nelle comuni installazioni HVAC permetta di eliminare i batteri contenuti nell'aria, ma non consenta di rimuovere le muffe presenti, per le quali servirebbero degli irraggiamenti di gran lunga superiori, da riservare a casi limite. Al contempo, è importante evitare che la luce UV colpisca direttamente i materiali organici utilizzati per la tenuta all'aria o per l'isolamento dei vari elementi, come guarnizioni, colle e gomme. Per questo motivo, si consiglia di proteggere i filtri dall'azione dei raggi ultravioletti, che potrebbero causarne il deterioramento. A tale proposito, si raccomanda l'impiego di dispositivi di filtrazione ad elevata efficienza, per impedire che le polveri sottili e le spore della muffa, poco suscettibili alla luce UV, non si depositino sulla superficie delle lampade, limitandone la performance.

In alternativa al posizionamento all'interno dell'UTA, come rappresentato in Figura 1.56, è possibile collocare i dispositivi UVGI nelle condotte di immissione o di ritorno, soluzione tipica per impianti che effettuano solo il ricambio dell'aria.

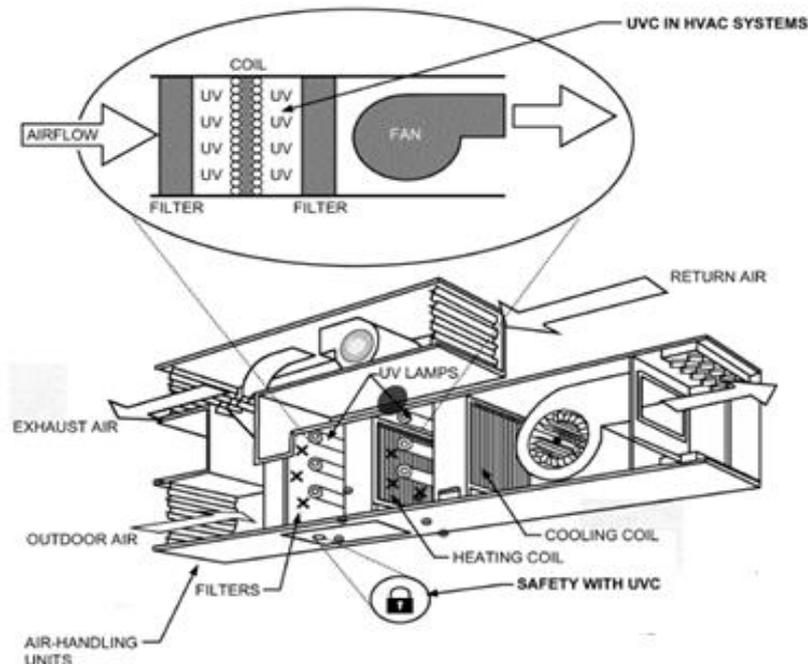


Figura 1.56. Possibile posizione delle lampade UVGI all'interno dell'UTA degli impianti di ventilazione [107]

Secondo uno studio di Kujundzic et al. [77], l'inibizione degli agenti patogeni risulta efficace in presenza di elevate temperature e basse velocità di efflusso, mentre cala drasticamente altrove. In particolare, se si considera una velocità dell'aria di circa 2.5 m/s, ad una lunghezza di irradiazione di 2.4 m corrisponde un tempo di esposizione di 1 s. Come regola generale, il posizionamento delle lampade dovrebbe essere tale da fornire una durata minima di esposizione ai raggi UV di 0.25 s [107].

Ulteriori fattori che possono influenzare il rendimento delle tecnologie UVGI sono rappresentati dall'umidità, dal coefficiente di riflessione superficiale dei canali e dal tipo di microorganismo considerato. Ad esempio, il ceppo dei *Coronavirus* è più suscettibile alla luce ultravioletta rispetto agli *Adenovirus*, ma un minor rendimento è stata riscontrato contro il *Micrococcus luteus* ad alti valori di umidità relativa. Inoltre, la tecnologia UVGI è in grado di controllare la diffusione del *Mycobacterium tuberculosis* e del morbillo [109]. Ovviamente, contaminanti diversi implicano differenti dosi minime raccomandate per l'inattivazione degli stessi, indicate con D ed espresse in $\mu\text{J}/\text{cm}^2$; a queste, corrispondono delle durate di irradiazione t_I più o meno lunghe a seconda della percentuale di disinfezione da raggiungere e della potenza irradiata E in $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ (di solito compresa tra 1000 e 10000 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$):

$$t_I = D/E \quad [\text{s}]$$

In Tabella 1.26 viene proposto un estratto dei principali agenti patogeni e delle relative dosi minime raccomandate:

Tabella 1.26. Dose minima approssimativa in J/m^2 di radiazione ultravioletta a 254 nm richiesta per la distruzione al 90% di vari agenti patogeni

Agente patogeno	Nome	Dose [J/m^2]
Batteri	Bacillus anthracis	45
	Clostridium tetani	130
	Escherichia coli	30
	Mycobacterium tuberculosis	62
	Salmonella enteritis	40
	Staphylococcus albus	18
Alghie	Diatomee, alghe blu e verdi	3600-6000
Protozoi	Paramecium	640-1000
Spore di muffe	Aspergillus flavus	600
	Mucor racemosus	170
	Oospora lactis	50
	Penicillium digitatum	440

Al momento non sono disponibili test specifici che dimostrino l'efficacia dei raggi UV nei confronti del Covid_19; sono comunque presenti studi di letteratura che avvalorano gli effetti positivi associati al trattamento mediante radiazioni UV di virus molto simili, come quello della SARS o della MERS [110].

Per l'installazione e l'esercizio occorre considerare i seguenti punti:

- le lampade UV dovrebbero essere montate perpendicolarmente al flusso d'aria;
- la distanza tra le lampade non dovrebbe superare i 10 cm;
- è utile provvedere mensilmente alla pulizia dei tubi e delle pareti riflettenti con un panno di lana;
- le lampade andrebbero sostituite ogni anno e non oltre 9000 ore di funzionamento;
- l'accensione delle lampade deve essere segnalata esternamente per mezzo di una spia luminosa.

Infine, ma non meno importante, il tema della sicurezza. Le radiazioni UV sono infatti nocive per l'uomo in quanto possono provocare congiuntiviti ed eritemi, fino a problemi ben più gravi. Sebbene siano installate all'interno dell'UTA, bisogna evitare che un qualsiasi individuo possa venire a contatto con la luce ultravioletta: per questo motivo, vengono utilizzati dei sistemi di protezione ridondanti che spengono le lampade nel momento di apertura dei pannelli di accesso.

1.4.7.2) Ionizzatori NTP

I dispositivi di ionizzazione a plasma freddo possono essere posizionati nell'UTA o nel canale di immissione della VMC. Ciò permette di sanificare l'aria esterna e l'aria interna ricircolata con una sola macchina, senza la necessità di avere un sanificatore puntuale per ogni locale. In Figura 1.57 vengono rappresentate alcune opzioni di installazione:



Figura 1.57. Opzioni di installazione di ionizzatori NTP [39]

Il metodo più semplice per creare artificialmente un plasma è l'utilizzo di una scarica elettrica all'interno di un gas. Nel caso del plasma freddo, si utilizzano le cosiddette scariche non termiche, che possono essere distinte in scarica corona e scarica a barriera di dielettrico.

Indipendentemente dal processo di formazione del plasma, **la tecnologia NTP è in grado di abbattere i VOC, gli odori, i batteri, le muffe e i virus, lasciando come residuo del materiale inerte che deve essere opportunamente eliminato.** Questo tipo di processo, inoltre, aumenta il flusso di ossigeno al cervello, migliorando le prestazioni mentali e cognitive, genera energia e contribuisce a ridurre gli stati di depressione. Come effetto secondario, tende ad agglomerare le polveri sottili, rendendole meno pericolose per gli alveoli polmonari [106].

Ulteriori vantaggi consistono nella silenziosità e nella possibilità di un controllo volto ad ottimizzare il funzionamento giornaliero e ad incrementare la durata delle lampade, oltre a segnalare i tempi di manutenzione.

1.4.8) Sistemi decentrali e macchine delocalizzate

I sistemi di ventilazione canalizzati sono caratterizzati da ingombri elevati e da alti costi d'investimento, che, nella maggior parte dei casi, non sono compatibili con i normali interventi di riqualificazione degli edifici esistenti. Pertanto, negli ultimi anni si sono diffuse delle **macchine decentralizzate in grado di effettuare il ricambio d'aria richiesto senza l'ausilio di canali di distribuzione**, ma prelevando l'aria

direttamente attraverso una parete esterna. Sebbene i modelli disponibili sul mercato siano molteplici, sono da preferire i dispositivi dotati delle seguenti caratteristiche:

- elevata efficienza di recupero termico;
- regolazione della portata d'aria in funzione dei parametri di qualità ambientale interna, come CO₂, temperatura e umidità relativa;
- elevata efficienza di filtrazione;
- basso impatto acustico;
- flessibilità di installazione, di pulizia e di smontaggio dei componenti principali.

Analogamente a quanto accade con la VMC canalizzata, è fondamentale che l'esercizio dei sistemi decentrali sia tale da garantire la classe di IEQ richiesta dal committente durante l'intero periodo di occupazione degli ambienti. Di conseguenza, **la taglia della macchina deve essere scelta in funzione del numero massimo di utenti e della destinazione d'uso del locale**, prevedendo, se necessario, più macchine a servizio di un unico ambiente, a patto che vengano **rispettati i requisiti di comfort acustico e termigrometrico** previsti dalla legge. Altrove, è possibile dimensionare i sistemi decentrali per portate di rinnovo inferiori rispetto a quelle di progetto, a patto che la ventilazione meccanica venga integrata con l'apertura manuale o automatica dei serramenti, dando quindi vita a dei sistemi ibridi, trattati più diffusamente al paragrafo 1.5.

In generale, si possono distinguere le due seguenti tipologie di sistemi decentrali a recupero di calore:

- macchina con immissione d'aria continua, caratterizzata da un doppio canale con immissione ed estrazione separate (Figura 1.58);
- macchina con immissione d'aria discontinua, provvista di un singolo canale con flusso d'aria unidirezionale.

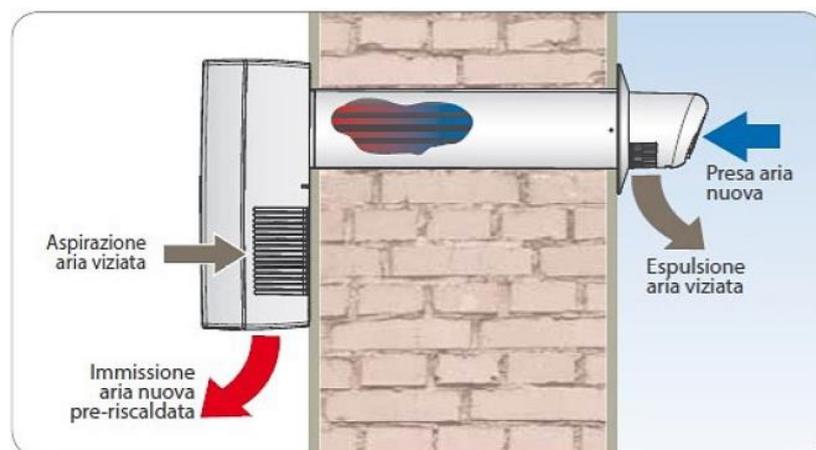


Figura 1.58. Macchina di ventilazione decentralizzata con immissione d'aria continua [39]

Sebbene i sistemi di tipo B trovino applicazione in ambito residenziale, gli edifici scolastici non si adattano al funzionamento di tali dispositivi, a causa delle basse portate elaborate e della possibile contaminazione dell'aria fresca in ingresso; viceversa, **gli apparecchi di tipo A possono soddisfare i ricambi d'aria prescritti ai fini della qualità dell'aria interna, soprattutto se progettati ad hoc per le aule.** Quest'ultimi, in particolare, dovrebbero consentire una modulazione continua della portata sulla base delle letture provenienti dai sensori di CO₂, VOC, temperatura, umidità e/o di presenza, mediante un inverter collegato al ventilatore. In alternativa, la regolazione del ricambio d'aria può avvenire secondo delle velocità preimpostate, gestibili direttamente dall'utente. Ciò nonostante, si sottolinea come questa seconda modalità di controllo sia meno performante e più energivora rispetto alla prima.

Le configurazioni impiantistiche sono molteplici e comprendono installazioni a parete, a soffitto o a pavimento, oppure integrate negli infissi, previa verifica dell'effettiva capacità di ventilazione di tali sistemi. È altresì importante precisare come negli ultimi anni siano apparse sul mercato delle soluzioni dedicate espressamente alle aule scolastiche, ovvero delle unità di ventilazione meccanica decentralizzata a doppio flusso con elevata filtrazione dell'aria e recupero di calore sensibile e latente. Queste macchine, caratterizzate da portate d'aria di rinnovo fino a 800-1000 m³/h, possono essere facilmente integrate negli spazi già esistenti senza la necessità di canalizzazioni e opere edili onerose; infatti, richiedono due soli carotaggi su parete perimetrale per la mandata e la ripresa dell'aria e si configurano pertanto come efficaci interventi di risanamento dell'IAQ negli edifici scolastici.

Indipendentemente dalla tecnologia installata, si raccomanda il rispetto di tutte le indicazioni valide per gli impianti VMC e relative alla filtrazione, al recupero termico, alla rumorosità, alle correnti d'aria, al bilanciamento delle portate di immissione ed estrazione e alle operazioni di gestione, pulizia e manutenzione. Si prediligano, ad esempio, delle macchine con una portata di progetto minore o uguale al 70% della portata massima elaborabile dalle stesse e caratterizzate da un livello continuo equivalente di potenza sonora ponderata A non superiore a 24 dB(A) [45].

Oltre all'impatto acustico, un'ulteriore criticità consiste nell'efficienza di distribuzione dell'aria: a tale proposito, per evitare la corto-circuitazione dell'aria fresca e dell'aria esausta, i sistemi di tipo A dovrebbero essere dotati di bocchette interne ed esterne con alette orientate in maniera contrapposta tra immissione ed estrazione. Inoltre, è importante che venga assicurata una ventilazione minima anche durante i periodi di non occupazione, similmente a quanto visto per la VMC canalizzata.

1.4.9) Ventilazione meccanica e Coronavirus

Alla luce degli ultimi studi relativi alla possibile trasmissione del virus per via aerea tramite particelle infette, appare evidente come un'adeguata immissione di aria esterna priva di contaminazione rappresenti una valida soluzione per contenere il rischio di infezione da Covid-19. Gli impianti di ventilazione meccanica possono rispondere a tale esigenza in modo più efficace della semplice areazione naturale, in quanto garantiscono la filtrazione e un ricambio d'aria a portata costante in qualsiasi condizione climatica [105]. A tale proposito, AiCARR, REHVA, ISS e ASHRAE concordano sul fatto di esercire gli impianti con la maggior quantità di aria esterna possibile, compatibilmente con le caratteristiche degli stessi.

Si sottolinea come le considerazioni affrontate nella presente trattazione riguardino soprattutto ambienti ad elevato affollamento, come gli uffici e le aule scolastiche. Questi sono serviti generalmente da unità di trattamento aria (UTA) o da sistemi VMC di grande taglia, le cui operazioni di ricircolo e di recupero termico meritano particolare attenzione. Tali procedure, infatti, se non correttamente gestite durante l'attuale situazione emergenziale, possono dar luogo ad un incremento del rischio di contagio indiretto via aerosol in presenza di un individuo positivo all'interno degli ambienti. Pertanto, le raccomandazioni in oggetto vogliono rappresentare uno strumento di supporto per progettisti e manutentori, affinché essi garantiscano il buon funzionamento degli impianti di ventilazione, sia dal punto di vista dei consumi energetici che della qualità ambientale interna. È ben nota, infatti, l'importanza del ricircolo e del recupero di calore nel mantenimento delle condizioni di comfort termico, così come nella riduzione dei costi d'esercizio.

Indipendentemente dalla destinazione d'uso dell'edificio, le misure di prevenzione devono essere declinate in modo opportuno a seconda dei sistemi considerati. Questi, in generale, possono essere distinti in impianti misti ad aria primaria e impianti a tutta aria: i primi sono concepiti per fornire la sola quantità di aria esterna richiesta per l'abbattimento del carico inquinante e sono integrati da terminali ambiente idronici o ad espansione diretta; ai secondi, invece, suddivisibili a loro volta in sistemi monozona o sistemi multizona con ricircolo locale o centralizzato, viene affidato il controllo della qualità dell'aria e delle condizioni di comfort termico. In particolare, per ognuna delle suddette tipologie impiantistiche, ad eccezione dei sistemi a tutta aria esterna, si raccomandano le seguenti operazioni [111]:

- 1) **aumento della portata d'aria elaborata:** può essere effettuata attraverso un incremento del numero di giri del ventilatore, agendo sulla frequenza di alimentazione del motore elettrico per macchine dotate di inverter, variando il rapporto di trasmissione delle giranti provviste di cinghia e pulegge oppure modificando l'angolo di incidenza delle pale nel caso di ventilatori assiali. L'intervento deve riguardare sia il ventilatore di mandata dell'aria esterna che quello di ripresa dell'aria esausta e deve preservare la differenza di pressione nei singoli ambienti. Inoltre, è importante verificare che l'assorbimento elettrico del motore sia compatibile con i limiti espressi dai dati di targa;
- 2) **forzatura serrande in sola aria esterna:** consiste nella chiusura totale della serranda di ricircolo e la contemporanea apertura delle serrande di aria esterna e di espulsione. Tale prescrizione non vale per impianti a tutta aria multizona con ricircolo locale;
- 3) **disattivazione o bypass del recuperatore di calore:** secondo il protocollo AiCARR [111], i recuperatori rotativi, così come qualsiasi altro recuperatore entalpico, dovrebbero essere disattivati o bypassati per evitare una possibile contaminazione dell'aria immessa. In contrasto a tale disposizione, si sottolinea come lo stato dell'arte delle tecnologie di scambio termico latente preveda anche dei dispositivi in grado di bloccare completamente, mediante apposite membrane, il trasferimento di contaminanti biologici di dimensioni ben inferiori a quelle dei coronavirus. Di conseguenza, il bypass del recuperatore di calore andrebbe effettuato solo in presenza di uno scambiatore rotativo o dove sussistano le condizioni per la trasmissione di cariche virali tra il flusso di immissione e quello di ripresa. Quest'ultima circostanza può manifestarsi, ad esempio, in

impianti di ventilazione datati o qualora non sia stata eseguita una corretta manutenzione e pulizia dei componenti secondo le disposizioni del costruttore. Tali accorgimenti valgono per impianti centralizzati multizona, mentre per sistemi a servizio di un singolo ambiente, comprese le macchine decentrali, la disattivazione del recuperatore non incide sui livelli di rischio;

- 4) **mantenimento del set-point di umidità relativa compreso tra 40% e 60%;**
- 5) **funzionamento in continuo dell'impianto alla portata massima con tutta aria esterna:** fa sì che l'aria interna, al momento della riapertura dei locali, si trovi alle condizioni di quella esterna. In alternativa al funzionamento dell'impianto alla portata massima 24/7 è possibile esercire l'impianto alla portata minima solo nelle ore notturne, portandola comunque al valore massimo 2 ore prima dell'occupazione e fino a 2 ore dopo il termine delle lezioni.

Relativamente all'operazione 2), AiCARR ha rivisto di recente la propria posizione, accettando il ricircolo ma solo in presenza di un contributo che non sia nullo in termini di abbattimento del bioaerosol, attuabile ad esempio attraverso l'installazione di lampade UVGI e/o di depuratori d'aria ambiente con filtri HEPA. Oltre al contenimento dei consumi energetici, i benefici derivanti dall'esercizio del ricircolo comprendono l'abbattimento dei carichi termici previsto da progetto, il corretto funzionamento dei diffusori e la maggiore diluizione dei possibili agenti infettanti nel volume condizionato. Si raccomanda comunque di valutare caso per caso la convenienza o meno del ricircolo, anche a seconda dell'efficacia dei dispositivi di abbattimento presenti.

In riferimento all'esercizio dei recuperatori entalpici, AiCARR assume una posizione molto cautelativa, suggerendone la disattivazione o il bypass in qualunque circostanza. In effetti, soprattutto nel settore terziario o negli edifici ad uso scolastico, gli impianti di ventilazione vengono mantenuti in modo approssimativo e molto spesso il gestore non è a conoscenza dello stato in cui si trovano i componenti d'impianto, così come della tipologia di scambiatore installato. Nel funzionamento di tali sistemi, la disattivazione del recupero di calore durante il periodo emergenziale da Covid-19 appare dunque ragionevole. Viceversa, gli impianti di nuova generazione dotati di scambiatori entalpici statici con membrane opportunamente testate (ad esempio secondo lo standard ASTM F-1671) possono lavorare normalmente senza la necessità di bypassare lo scambiatore. Ancora, per quanto concerne i recuperatori rotativi, AiCARR ammette la possibilità di prevenire qualsiasi trafilamento tra i due flussi mediante alcuni accorgimenti tecnici, come il corretto posizionamento dei ventilatori rispetto allo scambiatore e la presenza di un settore di lavaggio installato con riferimento al senso di rotazione della ruota. Queste condizioni implicano, una volta verificate, il normale utilizzo del recuperatore rotativo [105].

A prima vista queste precauzioni potrebbero sembrare eccessive: in realtà, uno studio condotto da AiCARR [112] ha dimostrato come, in presenza di un contagiato, il numero di cariche virali elementari presenti in ambiente a fine giornata non sia mai pari a 0, qualunque sia la quantità di aria esterna immessa (Figura 1.59). Di conseguenza, è necessario continuare a ventilare anche in assenza di persone, almeno durante la situazione emergenziale.

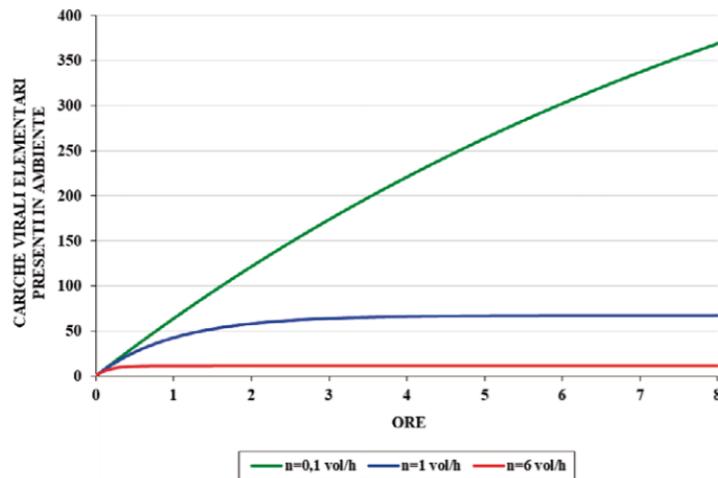


Figura 1.59. Andamento nel tempo delle cariche virali elementari presenti in ambiente per ogni persona infetta in funzione del tasso di ventilazione [112]

Si osservi come tutti gli interventi presuppongano determinate azioni sul sistema di controllo: in particolare, la modifica più rilevante consiste nella disattivazione dell’algoritmo di regolazione della portata per far funzionare l’impianto alla portata massima. Si ricorda inoltre la necessità di affidarsi all’intervento del personale di manutenzione per le operazioni 1), 2) e 3).

Per gli impianti a tutta aria occorre fare una distinzione a seconda del numero di ambienti eserciti e della presenza o meno di ricircolo. In particolare, se il sistema è a servizio di una singola zona termica e/o non prevede ricircolo, è possibile applicare le considerazioni di cui sopra. In caso contrario, gli interventi da effettuare devono essere discretizzati in funzione dello schema impiantistico presente:

- A) impianti a tutta aria con ricircolo centralizzato: comprendono due diverse configurazioni, nelle quali il ventilatore di ripresa è comunque sempre posto a monte del collegamento al ricircolo, come mostrato in Figura 1.60:

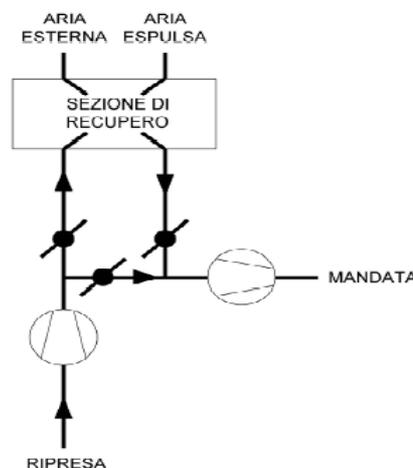


Figura 1.60. Impianti a tutta aria con ricircolo centralizzato [111]

La prima configurazione, che prevede il funzionamento in modalità di *free cooling*, è caratterizzata da serrande coniugate e motorizzate, oltre che da canali di ripresa ed espulsione dimensionate sulla massima portata d'aria. La seconda, che non contempla la possibilità di *free cooling*, presenta le condotte di aria esterna e di ripresa dimensionate in funzione della sola frazione di aria esterna; le serrande, pur essendo motorizzate e coniugate, sono dotate di un blocco manuale per impedire la chiusura completa del by-pass di ricircolo. È quindi necessario rimuovere tale blocco per esercitare l'operazione 2).

In generale, dunque, impianti di questo tipo possono adattarsi a tutti gli interventi menzionati in precedenza.

- B) impianti ad aria primaria con terminali ambiente o di zona: corrispondono ai sistemi VMC di nuova concezione, nei quali la portata d'aria esterna dipende solo dai due ventilatori presenti nell'unità di recupero del calore e indicati in Figura 1.61 come A e B. Il terzo ventilatore, C, non entra invece in gioco nell'aumento della portata d'aria esterna.

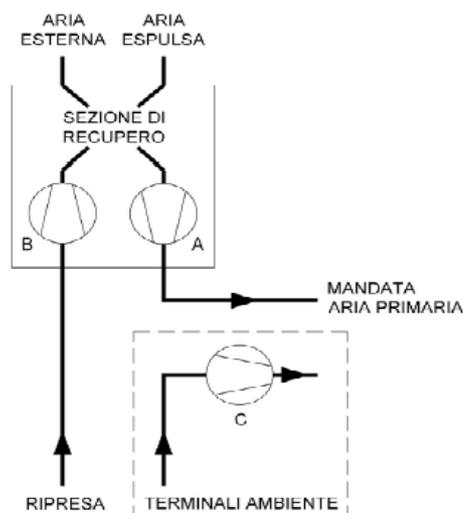


Figura 1.61. Impianto ad aria primaria con terminali ambiente o di zona [111]

Rispetto al caso precedente, in questi impianti non si effettua la forzatura delle serrande in sola aria esterna. I terminali ad aria primaria con solo ricircolo dell'aria ambiente possono continuare a lavorare, in quanto, altrimenti, si aggraverebbero le condizioni climatiche all'interno del locale e si ridurrebbe il benessere termico degli occupanti a fronte di una eventuale variazione di rischio marginale, di cui non vi è alcun riscontro in bibliografia. Il problema, infatti, non è tanto tenere accesi o spenti i terminali vicini al pavimento, quanto piuttosto limitare il numero di persone all'interno dei locali, soprattutto se di piccola dimensione, e aumentare la portata d'aria esterna [112].

A causa del lungo fermo impianti cui le scuole sono state sottoposte durante la recente fase di pandemia, si raccomanda di adottare le operazioni straordinarie di gestione e manutenzione suggerite da AiCARR per edifici o attività chiuse da più di 30 giorni [105]. In particolare, le azioni più importanti comprendono:

- la riattivazione e il recupero delle attività manutentive come da precedente programmazione;
- il funzionamento degli impianti per un tempo adeguato (1-2 giorni) per una completa riattivazione ed un controllo qualitativo dei corretti funzionamenti prima dell'uso definitivo dell'edificio;
- effettuare delle pulizie suppletive atte a rimuovere polveri ed eventuali depositi in bacini rimasti pieni;
- controllo ed eventuale sostituzione dei filtri se prossimi al fine vita.

Per quanto riguarda la filtrazione, poiché secondo diversi studi gli agenti patogeni sfruttano le particelle sospese in aria come mezzi di trasporto, è sufficiente continuare ad utilizzare i filtri presenti nell'UTA, prestando attenzione alle consuete operazioni di pulizia e manutenzione. Si raccomanda comunque di verificare che i filtri appartengano almeno alla categoria F7 o all'equivalente $50\% < ePM1 < 65\%$ secondo la nuova classificazione introdotta dalla norma UNI EN ISO 16890 e di controllare la totale assenza di trafile lungo il perimetro della sezione filtrante. Ciò nonostante, Eurovent consiglia di installare dei dispositivi più performanti, suggerendo per le scuole una classe minima di filtrazione pari a H13 [113].

La pulizia degli impianti, qualora effettuata, deve essere eseguita da personale qualificato, dotato di idonei Dispositivi di Protezione Individuali. Qualunque intervento effettuato in modo scorretto e/o senza l'utilizzo di DPI potrebbe avere come risultato non la riduzione, ma l'incremento dei rischi. Si sottolinea come allo stato attuale non ci siano evidenze in base alle quali risulti indispensabile provvedere in modo generalizzato a interventi straordinari di igienizzazione degli impianti, a meno che non venga individuata, durante l'ispezione tecnica, una concentrazione consistente di agenti patogeni [114]. Si rimanda al Protocollo AiCARR [105] per una descrizione dettagliata delle operazioni di disinfezione.

Un'ulteriore precauzione, da mantenere in fase di esercizio degli impianti, prevede l'estrazione dei bagni in funzione 24/7, controllando che tali zone siano sempre in depressione. Si consideri inoltre l'impiego di tecnologie UVGI o NTP all'interno degli impianti di ventilazione per la sanificazione dell'aria immessa.

1.5) Ventilazione ibrida

Riprendendo le parole di *Heiselberg* [115], i **sistemi di ventilazione ibrida** possono essere descritti come **“dei sistemi bimodali che generano delle condizioni ambientali di comfort sfruttando i principali vantaggi della movimentazione naturale e meccanica dell’aria, in funzione delle condizioni climatiche esterne giornaliere e/o stagionali”**. Ciò avviene per mezzo di opportuni algoritmi di controllo, in grado di gestire l’operatività dei suddetti sistemi al fine di minimizzare i consumi di energia e di preservare la qualità ambientale interna. Inoltre, l’elevata libertà di controllo concessa all’utente nella conduzione dell’areazione naturale può essere mantenuta anche nell’esercizio della ventilazione ibrida, potendo quindi godere dei benefici del comfort adattivo. Allo stesso tempo vengono salvaguardati i principali punti di forza della ventilazione meccanica, la quale è in grado di rispondere tempestivamente ad un incremento del carico termico e/o inquinante indipendentemente dall’entità delle forze naturali di movimentazione dell’aria (vento e temperatura).

Ciò nonostante, sarebbe un errore pensare ai sistemi ibridi come ad una mera combinazione tra finestre apribili e VMC; un edificio progettato per sfruttare le potenzialità di questo sistema - bassi costi d’esercizio, maggiore flessibilità d’impianto, elevata libertà di controllo da parte degli occupanti e aumento della produttività - dovrebbe innanzitutto contemplare delle strategie in grado di ridurre il carico di raffrescamento, tra cui l’impiego di schermature solari, l’installazione di sensori di presenza per i corpi illuminanti e l’esercizio del raffrescamento notturno. In questo modo, anche nelle zone climatiche più calde, è possibile limitare la richiesta di raffrescamento attivo e conseguentemente aumentare l’efficacia dei sistemi ibridi. A tale proposito, secondo uno studio condotto da *Steiger et al.* [116], la ventilazione ibrida è caratterizzata da un consumo energetico inferiore del 44-52% rispetto ai valori tipici dell’areazione naturale e meccanica. Questo risultato è stato ottenuto considerando il clima dell’Europa centrale, esercendo la ventilazione naturale durante l’estate e la ventilazione meccanica durante l’inverno, mentre nelle stagioni intermedie la scelta del sistema migliore è stata demandata all’algoritmo di controllo in funzione della temperatura interna misurata. Ancora, *Sowa & Karas* [177] hanno simulato il funzionamento di un impianto ibrido in una scuola esistente, riscontrando una riduzione importante dell’assorbimento elettrico da parte del ventilatore, nell’ordine del 40%.

Si sottolinea come la progettazione di tali impianti debba rispettare i principi di dimensionamento sia della ventilazione meccanica che dell’areazione naturale e pertanto richieda un’analisi accurata dell’andamento dei parametri climatici esterni, tra cui temperatura, umidità, direzione e velocità del vento. Inoltre, rimangono valide tutte le considerazioni già effettuate concernenti la sicurezza, la protezione antincendio, la pulizia, la manutenzione e la gestione dei ricambi orari durante il periodo di emergenza da Covid-19.

In linea teorica, il funzionamento di un impianto ibrido dovrebbe basarsi il più possibile sulla ventilazione naturale, incoraggiando gli occupanti alla gestione dell’apertura/chiusura dei serramenti e delle eventuali altre aperture. Da qui l’importanza di istruire gli utenti, compresi anche i manutentori, i custodi e lo staff di pulizia, sulle operazioni da effettuare per garantire un’elevata qualità ambientale interna in funzione delle condizioni climatiche esterne e delle attività svolte nei vari ambienti. Studi di letteratura hanno però dimostrato come gli occupanti tendano a ignorare tali istruzioni, intervenendo sull’apertura/chiusura

delle finestre solo con temperature esterne sufficientemente alte e/o a seconda della propria percezione di comfort. Per questo motivo, si sono via via diffuse delle soluzioni impiantistiche volte a mitigare l'impatto dell'utente sulla qualità ambientale interna, attraverso dei **meccanismi attivi di automazione dei serramenti tramite dei sensori di monitoraggio dell'IEQ** con visualizzazione continua del dato oppure mediante dei sistemi passivi di areazione naturale, come i camini solari e le intercapedini sotterranee. Di tutte queste tecnologie, le più promettenti dal punto di vista del consumo energetico e dell'IEQ sono rappresentate dai meccanismi di automazione delle finestre: a tale proposito, la Figura 1.62 mostra una panoramica dei risultati conseguiti da alcuni autori relativamente alla stima del potenziale massimo di risparmio ottenibile attraverso l'ottimizzazione delle operazioni di apertura e chiusura dei serramenti in differenti climi.

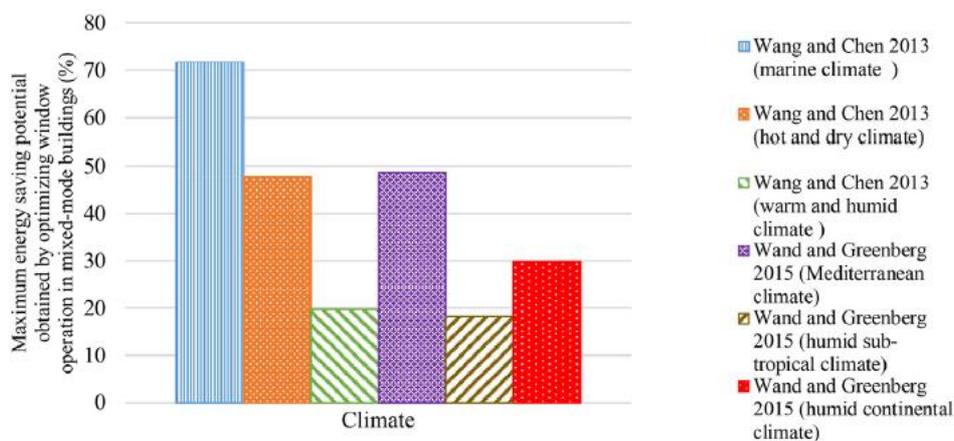


Figura 1.62. Potenziale massimo di risparmio energetico ottenibile mediante l'apertura/chiusura dei serramenti nella ventilazione ibrida [118]

Al progettista spetterà poi il compito di far interagire le suddette tecnologie con la ventilazione meccanica, individuando la strategia di controllo più opportuna a seconda delle caratteristiche dell'edificio e degli impianti ivi presenti.

Sebbene le configurazioni possano essere molteplici, l'attenzione si focalizzerà su tre principali tipologie di impianti ibridi e per ognuna di esse verranno presentate delle applicazioni reali in edifici scolastici esistenti.

1.5.1) Classificazione

Gli **impianti ibridi** possono essere distinti in **tre principali tipologie**:

- A) **sistemi distinti di ventilazione meccanica e naturale**: consistono in due impianti completamente autonomi, uno dedicato all'areazione naturale e l'altro alla movimentazione forzata dell'aria (Figura 1.63). Ciò corrisponde, ad esempio, a delle situazioni in cui l'areazione naturale viene utilizzata nelle stagioni intermedie, mentre la ventilazione meccanica viene esercitata in inverno e/o in estate; in alternativa, quest'ultima può lavorare solamente durante le ore di occupazione, lasciando alla ventilazione naturale il compito di areare e raffrescare l'edificio durante la notte e nei periodi antecedenti e/o successivi l'occupazione.

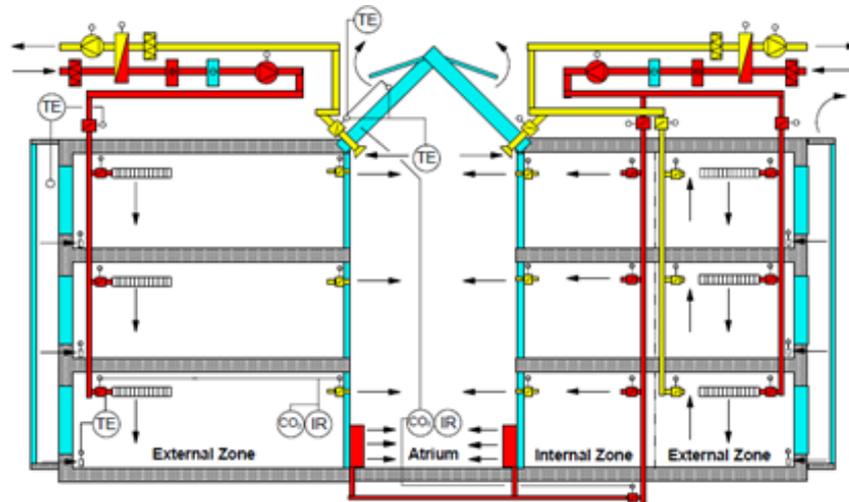


Figura 1.63. Soluzione ibrida con sistemi distinti di ventilazione naturale e meccanica [119]

B) **ventilazione naturale assistita**: si basa su un sistema di areazione naturale all'interno del quale sono presenti uno o più ventilatori di immissione e/o di estrazione (Figura 1.64). Essi infatti possono rivelarsi utili nel rafforzare il ricambio d'aria quando le forze naturali esterne non sono in grado di assicurare la portata di progetto o per coprire un improvviso incremento della richiesta di ventilazione.

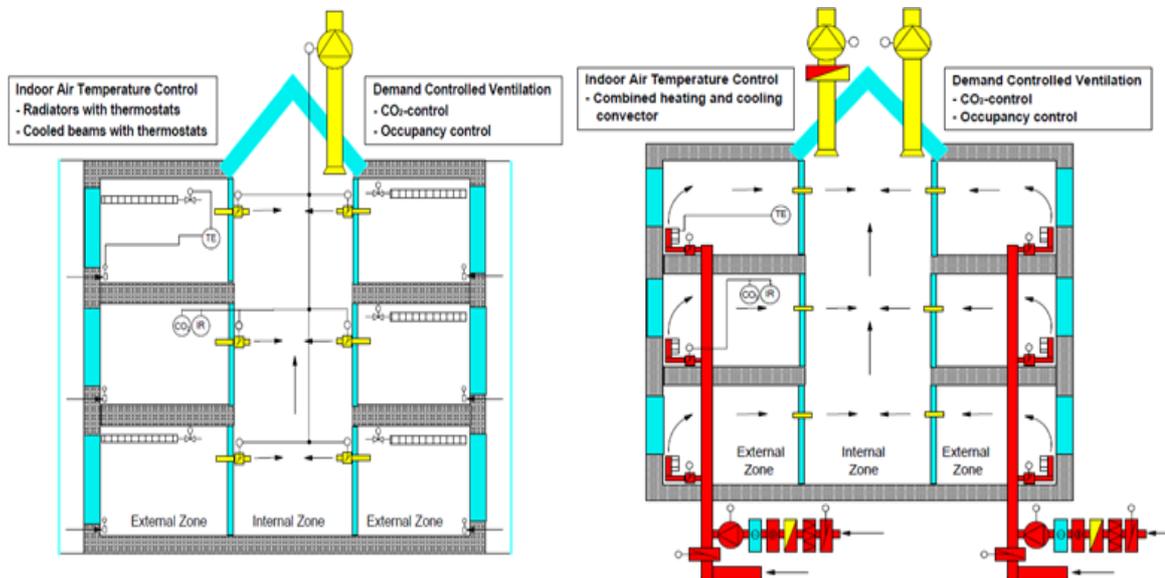


Figura 1.64. Soluzioni ibride con estrazione meccanica (a sinistra) e immissione più estrazione meccanica (a destra) [119]

C) **ventilazione meccanica assistita dal vento e dalla stratificazione termica**: consiste in un impianto di ventilazione meccanica che sfrutta al massimo le forze naturali di movimentazione dell'aria.

Si sottolinea come la diffusione di quest'ultima tipologia impiantistica sia attualmente molto limitata, a causa degli elevati costi d'investimento e delle difficoltà realizzative.

In Tabella 1.27 vengono elencati le principali caratteristiche delle tecnologie ibride finora analizzate, ad eccezione della soluzione C) (ventilazione meccanica assistita). Si osserva come gli impianti di tipo B) con ventilatore di estrazione non permettono la deumidificazione dell'aria in ingresso e questo potrebbe tradursi in problemi di elevata umidità interna durante l'estate.

Tabella 1.27. Caratteristiche delle tipologie ibride A) e B) [119]

Caratteristiche	Sistema A)	Sistema B)	
		Estrazione meccanica	Immissione ed estrazione meccanica
Perdite di carico	< 500 Pa	< 100 Pa	< 100 Pa con sola estrazione < 500 Pa altrove
Taglia componenti	Più grandi del normale	Serrande e terminali più grandi	Più grandi del normale
Disponibilità componenti	Normale	Limitata	Limitata
Difficoltà di design	Sistema di controllo e UTA	Dimensionamento serrande	Sistema di controllo e UTA
Richiesta di spazio	Più grande del normale	Minore del normale	Minore del normale
Filtrazione	Filtrazione possibile con la VMC	Non possibile	In immissione con la VMC accesa
Efficienza energetica	Migliore sia lato ventilatori che riscaldamento	Migliore lato ventilatore. No recupero termico	Migliore lato ventilatore. Possibile recupero termico
Apertura finestre	Possibile	Possibile	Possibile
Controllo IEQ	Eccellente	Buono, ma possibili problemi di umidità	Eccellente
Costi d'investimento	Elevati	Bassi	Normali
Flessibilità	Buona	Buona	Buona

Indipendentemente dalla tipologia considerata, nella progettazione di un impianto ibrido è necessario garantire un adeguato ricambio d'aria sia per la qualità dell'aria che per il comfort termico. Per quanto riguarda il primo aspetto, è opportuno contenere il tasso di rinnovo mediante la riduzione delle sorgenti inquinanti e attraverso un'attenta regolazione della domanda di ventilazione in funzione delle reali richieste degli occupanti. Ancora, per quanto concerne il secondo aspetto, si consiglia di sfruttare l'inerzia termica dell'edificio, soprattutto in riferimento all'esercizio del raffrescamento notturno, assicurandosi che gli occupanti non vengano esposti a temperature eccessivamente basse durante l'inizio delle attività scolastiche. Al contempo, il sistema deve prevenire la formazione di correnti d'aria, asimmetrie termiche radianti e rumore.

Come già osservato, la portata di progetto ai fini del comfort termico è ben maggiore rispetto a quella richiesta per la qualità dell'aria e ciò si traduce in criteri di progettazione differenti in funzione della zona climatica di appartenenza. Ad esempio, nei climi freddi, considerando un impianto ibrido basato su due sistemi distinti, la modalità naturale di funzionamento dovrebbe essere in grado di controllare autonomamente la temperatura, mentre la ventilazione meccanica, dimensionata per il controllo della qualità dell'aria, potrebbe contribuire al comfort termico nei momenti in cui le forze naturali esterne sono deboli. Viceversa, nelle zone climatiche più calde, la VMC dovrebbe fornire un ricambio d'aria tale da controbilanciare i carichi termici interni e solari nei periodi più caldi dell'anno, mentre la ventilazione naturale potrebbe essere utilizzata per il controllo della temperatura nelle stagioni intermedie e per il free cooling notturno in estate [115].

La presente trattazione non può prescindere dallo studio dei componenti relativi alla ventilazione naturale e meccanica e dai principi di progettazioni ad essi associati. Sebbene siano già stati analizzati nei capitoli precedenti, si ritiene importante esaminare come questi dispositivi e le loro caratteristiche possano essere declinate nei sistemi di ventilazione ibrida, soprattutto in riferimento ai temi del tiraggio naturale, delle perdite di carico, del risparmio energetico e del comfort termico:

- tiraggio naturale: per incentivare la movimentazione dell'aria, vengono spesso utilizzati dei camini solari e/o delle torri del vento. È importante che la loro geometria e posizione sia tale da mantenere in sovrappressione le aperture di ingresso e in sottopressione quelle di uscita, al fine di evitare la corto-circuitazione dell'aria esausta;
- perdite di carico: per assicurare delle basse perdite di carico, si consiglia l'utilizzo di corridoi, intercapedini o atrii, da preferire rispetto all'installazione di condotte dedicate. Si raccomanda inoltre di utilizzare dei terminali con basse perdite di carico;
- risparmio energetico: è associato alla presenza o meno del recupero termico. Per sistemi ibridi che si compongono di un impianto meccanico distinto da quello naturale, è possibile effettuare il recupero di calore dell'aria esausta, dando luogo ad un risparmio energetico importante soprattutto in inverno; per le altre tipologie ibride, il recupero termico può essere realizzato solo in rare situazioni, inserendo ad esempio un circuito intermedio di scambio tra immissione ed estrazione. Di grande importanza è inoltre il free cooling notturno, ottenibile mediante l'apertura manuale o automatica dei serramenti, oltre al pre-condizionamento dell'aria nei canali sotterranei e nelle intercapedini ventilate.
- comfort termico: la geometria dei serramenti e delle aperture integrate nell'involucro edilizio deve promuovere la ventilazione naturale, minimizzando al contempo il rischio di correnti d'aria fastidiose soprattutto durante la stagione invernale. Si suggerisce pertanto l'impiego di finestre a vasistas, oppure di griglie di immissione autoregolanti, provviste all'occorrenza di filtri.

Le strategie di controllo, affrontate nel paragrafo successivo, dovrebbero dunque garantire il rispetto di tutti i suddetti criteri.

1.5.2) Strategie di controllo

La sfida principale che caratterizza il **design dei sistemi di controllo della ventilazione ibrida** consiste nell'interazione ottimale tra il funzionamento dei ventilatori e l'apertura dei serramenti, così come di qualsiasi altra tecnologia di areazione naturale, compresi i camini solari e le intercapedini ventilate. La strategia adottata, oltre a soddisfare i livelli di comfort termico e di IAQ posti come obiettivo, dovrebbe garantire bassi costi d'esercizio e di installazione, preservando l'affidabilità complessiva dell'impianto e la libertà di controllo da parte degli utenti. Questi, sebbene possano rappresentare un "sistema di controllo" semplice ed economico, non sono in grado di assicurare il target di IEQ per tutto il periodo di utilizzo dell'immobile, come confermato da diversi studi. Pertanto, si raccomanda l'implementazione di logiche di regolazione più sofisticate, basate ad esempio su algoritmi BMS di stampo predittivo, ma che contemplino comunque l'intervento dell'utente, correggendone eventualmente l'operato. Gli algoritmi possono interagire con sensori interni di CO₂, VOC, umidità e/o di presenza, modificando la portata d'aria sulla base dei valori misurati; in altri casi, possono lavorare secondo dei profili di occupazione prefissati.

I parametri che influenzano il rendimento e l'efficacia dei sistemi di controllo sono rappresentati dalle caratteristiche geometriche ed energetiche dell'edificio, dalle condizioni esterne, sia in termini di rumore che di inquinamento, ma anche dalle abitudini degli utenti. Si rinnova quindi l'invito a fornire loro precise istruzioni sul corretto esercizio della ventilazione naturale, soprattutto in relazione all'apertura e alla chiusura manuale dei serramenti. In particolare, uno studio di *Brown et al.* [120] afferma come gli occupanti siano più incentivati a rispettare le indicazioni dei tecnici nel caso in cui ricevano un *feedback* periodico circa il loro comportamento e gli effetti dello stesso sull'IEQ complessiva. Questo feedback può essere fornito sotto forma di informazioni cartacee, comunicazione orale, segnali luminosi o, ancora meglio, schermi con monitoraggio in tempo reale delle concentrazioni di inquinanti e/o dei parametri termo-igrometrici. Infatti, secondo *Darby* [121], tali soluzioni possono dar luogo a dei risparmi energetici compresi tra 5 e 15% rispetto ad una situazione identica ma priva di un simile meccanismo di feedback.

In alternativa all'areazione manuale, i serramenti possono essere controllati anche attraverso meccanismi di automazione, che ne gestiscono l'apertura/chiusura ai fini di un clima interno confortevole e di un ricambio d'aria presente anche durante le ore di non occupazione. Questo aspetto diventa particolarmente importante per locali come atrii o corridoi, in cui, soprattutto per motivi di sicurezza, le finestre rimangono molto spesso chiuse o non sono accessibili agli utenti. Ciò nonostante, si consiglia di lasciare all'utente la possibilità di interagire con il sistema di ventilazione, bypassando la regolazione automatica delle aperture. Infatti, una ricerca di *Cohen et al.* [122] ha dimostrato come, in edifici caratterizzati da un'automazione troppo complessa, si abbiano più lamentele per correnti d'aria, per rumori e per odori sgradevoli, a causa di fonti esterne temporanee e non previste. Allo stesso tempo, studi di letteratura [123] sottolineano come la presenza di finestre apribili manualmente possa dar luogo ad un incremento della produttività fino al 18%.

Date queste premesse, è possibile individuare due **diverse strategie di regolazione**, basate su altrettante tipologie di parametri:

- **tempo**: una ventilazione programmata secondo dei periodi di durata prestabilita, può essere applicata a quegli edifici in cui i profili di occupazione sono noti e pressoché costanti. Ancora, può

tornare utile per discretizzare il funzionamento invernale da quello estivo e per assicurare il free cooling notturno;

- **IEQ:** il tasso di rinnovo varia in funzione della temperatura esterna e interna, della velocità del vento, della concentrazione di CO₂ e di altri inquinanti indoor.

Mediante il controllo dei suddetti fattori, i quali però non si escludono l'uno con l'altro, è possibile regolare opportunamente la velocità dei ventilatori, nonché l'apertura di finestre e serrande. Ne derivano i seguenti i seguenti **regimi di funzionamento:**

- **simultaneo:** viene garantita una ventilazione minima tramite i ventilatori, che operano assieme ai dispositivi di areazione naturale. È la strategia attualmente più utilizzata e prevede che i due sistemi lavorino in contemporanea e nello stesso ambiente;
- **commutativo:** i dispositivi di areazione meccanica e naturale vengono utilizzati in alternativa gli uni agli altri a seconda delle esigenze;
- **di zona:** se all'interno di uno stesso edificio sono presenti delle zone caratterizzate da differenti fabbisogni termici e di ventilazione, è possibile applicare in ognuna di esse dei sistemi naturali o meccanici a seconda delle esigenze.

Questi regimi di funzionamento possono essere applicati in periodi di tempo più o meno lunghi, dando luogo alle seguenti logiche di controllo:

- **controllo giornaliero ordinario:** il ricambio d'aria può essere regolato, ad esempio, in funzione dell'occupazione o della concentrazione interna di CO₂. Una semplice strategia potrebbe prevedere l'esercizio continuativo della ventilazione naturale, ricorrendo alla ventilazione meccanica solo in caso di superamento di un determinato valore di target, come la concentrazione interna di CO₂ o la temperatura;
- **controllo stagionale:** si consiglia di differenziare la regolazione tra estate e inverno, assumendo rispettivamente come variabile di ottimizzazione la temperatura interna e la concentrazione di CO₂; nelle stagioni intermedie, la regolazione dell'impianto ibrido dovrebbe essere tale da rispondere efficacemente ad una domanda di riscaldamento o raffrescamento, mediante l'uso simultaneo o separato della ventilazione meccanica e naturale;
- **controllo del carico di picco:** l'impianto meccanico potrebbe entrare in funzione solamente durante i picchi del carico termico;
- **free cooling notturno:** può essere effettuato sia in modo manuale che automatico. Nel primo caso agli utenti devono essere fornite chiare istruzioni su come e quando aprire i serramenti; nel secondo caso, da preferire rispetto al primo, il controllo della ventilazione notturna può avvenire stanza per stanza oppure a livello centralizzato, utilizzando le temperature rilevate in locali rappresentativi come variabili di feedback. Raggiunto il valore limite inferiore, l'immissione di aria fresca deve essere interrotta, al fine di ottenere una temperatura operativa accettabile prima dell'inizio delle attività scolastiche;

- **controllo dell'umidità**, soprattutto in presenza di travi fredde;
- **ventilazione e condizionamento degli ambienti pre e post occupazione**, a seconda delle esigenze;

Indipendentemente dalla strategia adottata, l'algoritmo di regolazione dovrebbe essere semplice e affidabile: benché sul mercato esistano delle logiche di stampo predittivo e stocastico, è raro che queste trovino applicazione negli edifici esistenti, a causa delle difficoltà relative alle fasi di implementazione e di taratura. Inoltre, il controllo della ventilazione andrebbe integrato con quello di riscaldamento, raffrescamento e illuminazione, accorpando il tutto in un unico sistema BMS caratterizzato da un'interfaccia intuitiva e trasparente, affinché i manutentori possano apportare le dovute modifiche senza l'intervento del progettista.

1.5.2.1) Esempio di una strategia di controllo

Viene di seguito approfondito l'algoritmo di controllo applicato ad un edificio ad uso uffici ubicato nella città di Tokyo [122]. Tale algoritmo, infatti, può essere facilmente declinato al controllo della ventilazione nelle aule scolastiche poste su più piani, sia per le nuove costruzioni che per i risanamenti, e prevede l'impiego di serramenti, di ventilatori a bassa potenza (900-450 W) e di macchine di raffrescamento ad espansione diretta. Qui il sistema di movimentazione naturale dell'aria consiste in un grande camino solare che si sviluppa per tutta l'altezza dell'edificio, le cui aperture vengono azionate meccanicamente in funzione dei parametri di IEQ monitorati; ciò nonostante, viene concessa agli occupanti la possibilità di bypassare l'algoritmo di controllo, chiudendo ad esempio le finestre nel caso in cui vengano percepite condizioni di discomfort. In aggiunta, il sistema viene resettato alle 12:00, alle 18:00 e alle 22:00 per verificare che gli occupanti non abbiano lasciato chiuse le aperture anche dopo il ripristino delle condizioni di comfort.

In particolare, durante le ore di occupazione, la ventilazione naturale viene ritenuta accettabile quando le condizioni esterne soddisfano le seguenti condizioni: $RH < 80\%$, velocità del vento < 15 m/s per i precedenti 15 minuti, precipitazione < 2 mm/hr e temperatura esterna compresa tra 18 e 26°C. La regolazione della portata d'aria in funzione della temperatura interna al camino avviene per mezzo di serrande motorizzate secondo la curva di Figura 1.65.

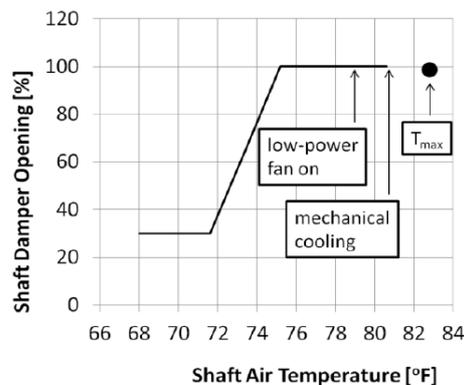


Figura 1.65. Curva di regolazione del sistema di ventilazione in funzione della temperatura dell'aria in ingresso al camino solare [122]

La temperatura massima interna, indicata in Figura 1.65 con l'acronimo T_{max} , viene imposta pari a 25 e 28°C, rispettivamente per l'inverno e per l'estate. Il free cooling notturno può essere esercitato dalle 22:00 alle 8:00 mediante l'apertura dei serramenti, previa verifica che la temperatura esterna sia inferiore a quella interna, che a sua volta dovrebbe essere maggiore di 22°C. Se le forze naturali non sono in grado di assicurare una sufficiente ventilazione notturna, e se la temperatura interna è superiore a 25°C alle 5:00, intervengono i ventilatori a bassa potenza per incrementare il flusso in ingresso. Ciò può accadere anche durante le ore di occupazione: qui l'accensione e la regolazione del numero di giri dei ventilatori avviene sempre in funzione dei parametri di comfort monitorati, fino all'eventuale accensione delle unità ad espansione diretta nel caso in cui non si riesca a ridurre la temperatura interna entro valori accettabili rispetto al limite massimo fissato.

Nel medesimo studio [122], viene inoltre sottolineato come il monitoraggio della temperatura esterna debba avvenire, preferibilmente, in corrispondenza delle aperture dell'edificio, piuttosto che mediante un sensore posizionato sul tetto; altrimenti, la temperatura misurata potrebbe differire anche di molto rispetto a quella reale, soprattutto durante le giornate soleggiate e le notti limpide.

Nel prosieguo verranno mostrati altri esempi riguardanti la regolazione della portata d'aria in funzione della tecnologia di ventilazione ibrida considerata. Ciò nonostante, si ritiene interessante proporre con la Figura 1.66 una descrizione sintetica delle strategie di controllo relative ai casi studio investigati nell'ambito dell'IEA-ECBCS Annex 35 "Hybrid Ventilation in New and Retrofitted Office Buildings" [115].

Case Studies	Type	Control Strategy			
		Indoor air quality	Room temperature	Night ventilation	Mechanical cooling
Wilkinson building	Office	Man.	Man.	-	Man.
IVEG building	Office	PIR	Man.	Aut.	0 ⁵
PROBE building	Office	PIR	Man.	Man.	-
B&O Headquarters	Office	CO ₂	Aut.	Aut.	-
B. Brecht Gymnasium	School	Man.	Man.	Aut.	-
I Guzzini Illuminazione	Office	Man.	Aut.	Aut.	Aut.
Liberty Tower of Meiji University	School	Con.	Aut.	-	Aut.
Tokyo Gas Earth Port	Office	Con.	Aut.	-	Aut.
Fujita Technology Center	Office	Con.	Aut.	Aut.	Aut.
Mediã School	School	CO ₂	Aut.	Aut.	-
Jaer School	School	CO ₂	Aut.	Aut.	-
Tãnga School	School	CO ₂	Aut.	-	-
Waterland School	School	CO ₂	Man.	Aut.	-

Figura 1.66. Strategie di controllo applicate nei casi studio investigati in IEA-ECBCS Annex 35. Man.: controllo manuale; Aut.: controllo automatico; Con.: ventilazione costante; PIR: VMC con monitoraggio dell'occupazione; CO₂: VMC con sensori di CO₂ [115].

Si nota chiaramente come la maggior parte delle scuole abbiano adottato un controllo automatico dell'IAQ mediante un sistema di ventilazione meccanica comandata da sensori di CO₂ e abbiano demandato l'esercizio del free cooling notturno ad un sistema automatico di apertura dei serramenti.

1.5.3) Principi di progettazione

Il successo o meno della ventilazione ibrida non può prescindere dai benefici derivanti dall'areazione naturale e il design della stessa deve avvenire contestualmente a quello dell'intero edificio, in funzione del layout del medesimo e delle caratteristiche climatiche del sito di ubicazione. I principi di progettazione sono analoghi a quelli già analizzati nei capitoli precedenti e quindi verranno omessi nella presente trattazione.

Si ricorda come **l'obiettivo principale sia quello di sfruttare al massimo le potenzialità derivanti dall'esercizio della ventilazione naturale nelle condizioni nominali di funzionamento, individuando la taglia ottimale dell'impianto meccanico sulla base del carico rimanente.**

Analogamente ai sistemi naturali e meccanici, la progettazione di un sistema ibrido ha inizio con la definizione dei valori target relativi alla qualità dell'aria interna, al comfort termico, ai costi d'investimento e di esercizio. Dopodiché, il processo di progettazione può essere suddiviso nelle seguenti fasi:

- 1) **design concettuale:** è di cruciale importanza per la realizzazione di un sistema di ventilazione che possa soddisfare i livelli di IEQ prefissati. Infatti, una volta verificato che la posizione, l'orientazione e le caratteristiche architettoniche dell'edificio non siano in contrasto con le forze naturali di movimentazione dell'aria, viene definita la tipologia di ventilazione ibrida da implementare;
- 2) **design di base:** in funzione dei carichi, sia termici che inquinanti, che caratterizzano l'edificio, vengono calcolate le portate d'aria richieste per garantire i target di IEQ posti come obiettivo. Sulla base di queste portate, viene poi definito il layout del sistema di ventilazione naturale, prestando particolare attenzione al dimensionamento delle aperture. Nel caso in cui i risultati del calcolo non fossero soddisfacenti, è possibile ritornare allo step precedente, modificando la strategia di ventilazione e all'occorrenza le caratteristiche geometriche dell'edificio.
- 3) **design dettagliato:** dopo aver scelto e calcolato la taglia del sistema meccanico sulla base del carico rimanente, viene definita la logica di controllo e con essa la posizione dei vari componenti d'impianto e dei sensori per il monitoraggio dei parametri ambientali interni. Dopodiché, attraverso dei tool di simulazione dinamica oraria, il sistema edificio-impianto può essere ottimizzato dal punto di vista dell'IEQ, dei consumi energetici e dei costi.
- 4) **valutazione del progetto elaborato:** vengono effettuate delle misure per confrontare i livelli di IAQ e di comfort termico con i valori target posti come obiettivo.

Quest'ultimi incidono pesantemente sulla scelta dell'algoritmo di controllo: se si accettano solamente delle piccole oscillazioni attorno ai valori di target, allora la ventilazione meccanica dovrà lavorare per un numero maggiore di ore rispetto a quanto accadrebbe con un range di variazione più ampio. In realtà, è bene evidenziare come gli occupanti siano disposti ad accettare delle variazioni anche importanti nei livelli target di IEQ nel caso in cui venga concessa loro la possibilità di controllare l'apertura dei serramenti.

Si sottolinea ancora una volta l'importanza del design concettuale nel rendimento complessivo del sistema di ventilazione. L'edificio, infatti, deve essere progettato per massimizzare i guadagni termici in

inverno e per minimizzarli in estate, con l'obiettivo ulteriore di limitare le infiltrazioni d'aria non desiderate e di sfruttare correttamente la luce naturale. L'impianto di areazione naturale performa al meglio solo rispettando tali criteri ed esercendo lo stesso al fine di ridurre i suddetti carichi, ad esempio mediante il free cooling. Ciò consente di ridurre la taglia del sistema meccanico, dimensionato nelle condizioni di progetto in funzione della quota parte rimanente dei carichi.

Nel caso in cui in un edificio esistente si voglia implementare la ventilazione ibrida oppure se, in caso di nuova costruzione, vi siano dei vincoli architettonici che impediscano di ottimizzare il progetto dell'immobile ai fini dell'areazione naturale, la probabilità che un impianto ibrido si dimostri efficiente sia da un punto di vista energetico che della qualità ambientale interna può essere valutata qualitativamente mediante le Tabelle 1.28 e 1.29.

Tabella 1.28. Probabilità di successo della ventilazione ibrida in funzione delle caratteristiche dell'edificio per il clima del Centro - Nord Europa [115]

Parametri relativi all'edificio	Probabilità di successo		
	Alta	Media	Bassa
% di superficie vetrata	30	70	100
Schermatura solare	esterna	interna	assente
Emissioni inquinanti da superfici	bassa	intermedia	alta
Altezza locale [m]	> 3	2.5 - 3	< 2.5
Profondità locale [m]	< 6	6 - 15	> 15
Caratterizzazione della massa termica	pesante	intermedia	leggera
Night cooling	possibile	parziale	non possibile
Utilizzo di effetto camino e vento	sì	parziale	no
Necessità di recupero termico	non importante	importante	molto importante
Possibilità di recupero termico	sì	parziale	no

Tabella 1.29. Probabilità di successo della ventilazione ibrida in funzione delle attività interne all'edificio per il clima del Centro - Nord Europa [115]

Parametri relativi alle attività interne	Probabilità di successo		
	Alta	Media	Bassa
Carichi interni [W/m ²]	< 20	20 - 30	> 30
Attività ad alta produzione di inquinanti	in stanze separate	parzialmente in stanze separate	distribuite nelle zone occupate
Durata tipica dell'occupazione	8 ore	16 ore	24 ore

In particolare, si consiglia di adottare la soluzione ibrida quando la maggior parte dei parametri presenta una probabilità di successo media o alta.

Relativamente alla fase di design dettagliato, l'utilizzo dei tool di simulazione appare imprescindibile per prevedere l'andamento delle portate d'aria e conseguentemente i livelli di comfort termico e di IAQ

conseguibili con una determinata strategia di controllo. Ad esempio, l'analisi dovrebbe restituire in uscita la durata dei periodi in cui le forze naturali non sono in grado di soddisfare la domanda di ventilazione e quella dei periodi in cui la ventilazione meccanica si dimostra più efficace della ventilazione naturale.

Idealmente, i metodi di analisi dei sistemi ibridi dovrebbero includere la modellazione della ventilazione naturale, della ventilazione meccanica e della strategia di controllo adottata, da integrare ovviamente con la simulazione termoigrometrica dell'edificio. Per quanto riguarda le scuole, caratterizzate da ambienti con differenti richieste di ventilazione, si suggerisce l'applicazione di metodi multizona o di altri programmi che permettano di simulare il comportamento di più zone termiche tra loro interconnesse. La fluidodinamica computazionale, può rivelarsi utile per studiare la distribuzione dell'aria all'interno degli edifici o solamente le performance della ventilazione naturale separatamente da quella meccanica e viceversa, ma non permette di analizzare il comportamento dell'intero impianto ibrido.

I modelli multizona [124] si basano su un approccio secondo cui l'edificio viene visto come un insieme di zone termiche tra loro interconnesse, incluse le condizioni al contorno rappresentanti l'ambiente esterno. Le zone sono collegate l'una all'altra da flussi di aria provenienti da fenditure, finestre e porte, le quali formano dunque un network di flussi. I dati di input includono:

- variabili meteorologiche, tra cui velocità e direzione del vento, pressione attorno all'edificio e temperatura esterna dell'aria;
- dimensioni, altezza interpiano e temperatura interna alle singole zone termiche;
- dimensioni e posizione delle aperture interne ed esterne;
- caratteristiche dei ventilatori e layout del sistema di distribuzione.

Si scoraggia l'impiego di modelli empirici o analitici, così come di strumenti in grado di simulare solo una singola zona termica. Si rimanda alla Tabella 1.30 per una descrizione sintetica dei tool di progettazione utilizzabili per lo studio della ventilazione ibrida.

Tabella 1.30. Caratteristiche dei modelli di progettazione della ventilazione ibrida [115]

Modelli	Obiettivo	Tools disponibili	Outputs	CPU time
Analitici/empirici	Analisi portate, comfort termico e consumo di energia in time steps discreti	Equazioni e semplici tools di dimensionamento	Temperatura media interna e di picco, DR, carico di riscaldamento e raffrescamento	Pochi minuti
Di zona	Analisi distribuzione temperatura e portata per singolo locale	POMA	Distribuzione flussi, concentrazione inquinanti e temperatura	1 - 10 ore
Multizona	Analisi IAQ e flussi attraverso l'involucro e tra zone termiche	COMIS, CONTAM	Portate attraverso le aperture e tra zone termiche, IAQ media in ogni locale	1 - 10 ore
Termici	Analisi oraria temperatura e consumo di energia	TRNSYS, EnergyPlus	Temperatura, carichi termici e consumo di energia orari	< 1 ora
CFD	Analisi IAQ, temperatura e portata in singole zone termiche	Fluent, Flovent	Distribuzione dettagliata di portata e temperatura	10 -100 ore
Multizona + termici	Ottimizzazione performance edificio e impianti	TRNSYS + COMIS	Variazione oraria di energia, temperatura, portata e IAQ	10 -100 ore

1.5.4) Casi studio

Per mettere ulteriormente a confronto le tre tipologie d'impianto ibrido presentate in precedenza e indicate con A), B) e C), verranno esplorate altrettante applicazioni esistenti nel settore dell'edilizia scolastica.

Sebbene tali applicazioni comprovino l'efficacia della ventilazione ibrida, è corretto precisare come siano ancora molte le barriere che ne impediscono una diffusione più generalizzata. Innanzitutto, la necessità di elevati ingombri al fine di contenere le perdite di carico comporta che i vari componenti d'impianto debbano essere progettati *ad hoc*, con conseguente sovraccarico dei costi d'investimento; inoltre, data la minor efficacia del recupero termico, vi è il rischio che i costi d'esercizio siano maggiori rispetto a quanto accadrebbe con un impianto VMC. Ancora, se i ventilatori utilizzati nei sistemi ibridi sono caratterizzati da potenze ridotte, ciò potrebbe ostacolare la reazione repentina dell'impianto ad un cambiamento delle condizioni meteo esterne o della domanda di ventilazione. Infine, a causa della mancanza di linee guida e di tools di calcolo accurati, si riscontra una certa diffidenza da parte dei committenti nei confronti dei

sistemi ibridi, soprattutto in relazione alla difficoltà di assicurare elevate portate di ricambio anche quando le forze esterne sono assenti o molto deboli.

Pertanto, la progettazione della ventilazione ibrida può essere considerata a tutti gli effetti come una nuova disciplina, che necessita di nuove competenze e di un approccio differente. Ciò nonostante, i sistemi ibridi analizzati finora si sono dimostrati idonei e perfettamente integrabili negli edifici scolastici [115].

1.5.4.1) Esempio tipologia A: The Liberty Tower of Meiji University

Il caso studio in questione è rappresentato da “The Liberty Tower of Meiji University”, ovvero da un palazzo di 23 piani posto nell’area metropolitana di Tokyo, al cui interno sono collocate anche delle aule scolastiche.

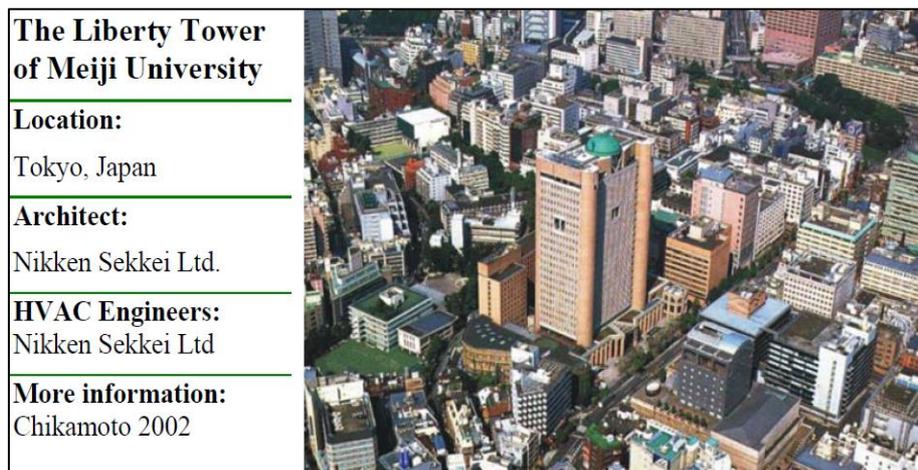


Figura 1.67. “The Liberty Tower of Meiji University” [24]

La ventilazione naturale permette il controllo dell’IAQ e della temperatura nelle stagioni intermedie, mentre l’impianto meccanico di ventilazione e condizionamento lavora nella parte restante dell’anno quando le condizioni climatiche esterne non sono favorevoli. Le aperture di ingresso dell’aria sono poste lungo il perimetro di ciascun piano e le aperture di uscita sono collocate sulla parte superiore del nucleo centrale. Il nucleo centrale è progettato per far sì che ad ogni piano venga sfruttato l’effetto camino; al di sopra del diciottesimo piano, è presente un’intercapedine ventilata aperta su tutti i lati, che consente di incrementare le forze naturali associate al vento, indipendentemente dalla sua direzione. Le aperture sono gestite in modo automatico mediante un sistema BMS che interagisce con sensori interni di CO₂ e temperatura. A sua volta, l’impianto meccanico di condizionamento immette aria a portata variabile in funzione della concentrazione interna di CO₂, della temperatura e dell’umidità relativa.

Entrando nel dettaglio della strategia di controllo, in inverno l’edificio viene riscaldato dal sistema di condizionamento e tutte le aperture sono chiuse; in estate la ventilazione naturale viene esercitata per il raffrescamento notturno; nelle mezze stagioni gli ingressi e le uscite sono aperte durante il giorno se la temperatura esterna è compresa tra 22 e 18°C e se quella interna è tra 28 e 22°C. Le aperture di

immissione e di estrazione sono controllate da un sistema di automazione e agli occupanti è concessa la libertà di poter gestire solamente alcuni serramenti per l'ingresso di una portata d'aria aggiuntiva.

I problemi più significativi consistono nelle correnti d'aria associate all'apertura dei serramenti inferiori e alle elevate perdite di carico che caratterizzano i passaggi lato ventilazione naturale a causa delle serrande installate per impedire la diffusione del fumo e del fuoco.

1.5.4.2) Esempio tipologia B: Tånga School

Un esempio ben collaudato di sistema ibrido è offerto da "Tånga School", ovvero da un edificio scolastico su due piani ubicato nell'area residenziale di Falkenberg, in Svezia. Esso è provvisto di un sistema di ventilazione naturale assistita, in cui tre ingressi per l'aria, con le rispettive serrande, sono posizionati sotto le finestre di ciascuna aula per realizzare una distribuzione dell'aria a miscelazione. Le aperture di estrazione sono collocate sotto il soffitto e convogliano l'aria all'interno di un condotto verticale di uscita, anch'esso fornito di serranda. Per incrementare l'effetto camino di ciascuna sezione, è stato installato sul tetto un camino solare di sei metri di altezza, equipaggiato con un ventilatore e con una serranda centrale montata in parallelo.



Figura 1.68. "Tånga School" [24]

Ovviamente è sempre garantita l'areazione manuale mediante l'apertura delle finestre, così come il free cooling notturno. Non è invece prevista la filtrazione dell'aria in ingresso né il recupero termico dell'aria esausta.

Il sistema di controllo è costituito da un sensore di CO₂ posto all'interno di ciascuna aula, che gestisce le rispettive serrande di immissione e di estrazione. Per concentrazioni minori o uguali a 1000 ppm, le serrande si trovano nella posizione di minima apertura, la quale viene però modificata in funzione delle condizioni climatiche esterne. Infatti, al diminuire della temperatura, la portata d'aria in ingresso mediante ventilazione naturale viene progressivamente ridotta per prevenire eccessive perdite energetiche e umidità relative troppo basse. Viceversa, se la differenza di temperatura tra interno ed esterno scende al di sotto di un certo valore, il ventilatore si attiva e la serranda centrale si chiude. Il ventilatore è a frequenza variabile e la velocità di rotazione cambia in funzione della differenza di

pressione che insiste attraverso la macchina, la quale aumenta al diminuire del differenziale di temperatura tra interno ed esterno.

Per quanto riguarda l'IAQ, tra 1000 e 1500 ppm di CO₂ un segnale luminoso indica il peggioramento della qualità dell'aria, mentre, per concentrazioni maggiori o uguali a 1500 ppm, le serrande di ciascuna aula vengono aperte al 100%. Inoltre, l'insegnante può modificare in qualsiasi istante la posizione delle serrande di ciascuna aula, tra il 50 e il 100% del grado di apertura.

1.5.4.3) Esempio tipologia C: Mediå School

La "Mediå School", scuola ad un piano ubicata in una piccola cittadina norvegese, rappresenta uno dei pochi edifici in cui è stato implementato con successo un impianto di ventilazione meccanica supportato dalle forze naturali di movimentazione dell'aria.



Figura 1.69. "Mediå School" [24]

Il ricambio d'aria viene assicurato da un impianto meccanico con terminali di immissione ed estrazione posti in ciascuna aula. Tale impianto ha il compito di assistere e sostenere la ventilazione naturale, dando vita ad un sistema ibrido. In particolare, l'aria viene prelevata da una torre che si trova ad una certa distanza dell'edificio e che utilizza le forze del vento per incentivarne l'ingresso. All'interno di questa torre si trova anche il ventilatore di mandata. L'aria fluisce poi attraverso un canale sotterraneo ad elevata inerzia termica al fine di ridurre le fluttuazioni giornaliere di temperatura e si distribuisce lungo un'intercapedine appositamente progettata sotto il pavimento dalla quale si staccano i vari terminali di immissione in ambiente. Questi sono posizionati nella parte inferiore delle aule affinché venga messa in pratica la ventilazione a dislocamento. L'aria esausta fluisce attraverso una seconda intercapedine a bassa inerzia termica posta sopra al soffitto e l'estrazione avviene per mezzo di una torre di uscita posta sul tetto, la quale realizza un'efficace espulsione verso l'esterno sfruttando il vento indipendentemente dalla sua direzione. La torre stessa è equipaggiata con un ventilatore di estrazione a bassa prevalenza. Il sistema, inoltre, include una sezione di filtrazione e di recupero termico mediante circuito intermedio ad acqua glicolata, con cui è possibile preriscaldare l'aria fresca in ingresso. Il ricambio d'aria viene dunque assicurato dai ventilatori, che lavorano in simbiosi con le forze naturali di movimentazione dell'aria.

La ventilazione viene controllata da un sistema BMS che interagisce con sensori di CO₂ presenti in ciascuna aula, i quali a loro volta, a seconda delle concentrazioni rilevate, determinano il grado di apertura dell'intercapedine di estrazione. Entrambi i ventilatori sono caratterizzati da un funzionamento a velocità variabile: il ventilatore di mandata viene controllato dalla pressione dell'intercapedine di immissione, che può eccedere quella esterna al massimo di 2 Pa, mentre il ventilatore di uscita ha il compito di mantenere una differenza di pressione di 5 Pa tra l'intercapedine di immissione e quella di estrazione, per evitare che l'edificio vada in sovrappressione.

1.5.5) Esempi di riqualificazione di edifici esistenti

La ventilazione ibrida può rappresentare una soluzione interessante anche nel contesto di lavori di ristrutturazione importante. A tale proposito, si consideri la scuola "Egebjergskolen" di Figura 1.70., ubicata in Danimarca e sottoposta, per una sua parte, ad un intervento di riqualificazione volto a sostituire il vecchio impianto di ventilazione meccanica con un moderno sistema ibrido in cui la ventilazione naturale viene assistita da un ventilatore di immissione a bassa potenza.



Figura 1.70. "Egebjergskolen" [125]

Al suo interno, la scuola è suddivisa in più classi disposte attorno ad un atrio centrale. L'atrio presenta un'altezza doppia rispetto a quella delle aule e culmina con una torre di estrazione contenente le aperture di uscita e un camino solare.

L'obiettivo è quello di migliorare la qualità dell'aria e di ridurre il consumo energetico, attraverso l'impiego di tecnologie innovative. Il criterio principale consiste nel mantenere una concentrazione di CO₂ inferiore a 1000 ppm in tutte le aule. Oltre al ventilatore e al camino solare, gli elementi progettati per adempiere a tale scopo comprendono delle condotte sotterranee di immissione, utilizzate per preriscaldare l'aria fresca durante l'inverno e preraffreddarla durante l'estate, dei serramenti apribili manualmente e un sistema di controllo automatico della ventilazione basato su sensori installati in ogni aula.

La portata di aria fresca in ingresso alle aule viene regolata attraverso delle serrande motorizzate in funzione della concentrazione interna di CO₂ e della temperatura rilevata. In particolare, quando le serrande e le finestre sono aperte, le perdite di carico sono molto piccole e ciò consente l'esercizio ottimale dell'effetto camino. Nel caso in cui si necessiti di un maggiore ricambio d'aria, il ventilatore di immissione viene acceso per assistere la ventilazione naturale.

Per quanto riguarda la strategia di controllo, la portata di rinnovo viene regolata gradualmente in ciascuna aula secondo la logica seguente:

- le aperture del camino solare si aprono quando la temperatura nel camino è maggiore della temperatura misurata nelle aule;
- le serrande si aprono quando la concentrazione di CO₂ supera i 700 ppm o quando la temperatura interna è maggiore di 23°C;
- il ventilatore si accende quando la concentrazione di CO₂ supera i 1400 ppm o quando la temperatura interna è maggiore di 25°C;
- in presenza di pioggia o con velocità del vento troppo elevate, le finestre si chiudono automaticamente.

A valle degli interventi effettuati, un sondaggio sottoposto agli studenti e agli insegnanti ha evidenziato un netto miglioramento della qualità ambientale interna percepita. Inoltre, confrontando le prestazioni della parte riqualificata rispetto a quelle della parte esistente, è emersa una riduzione del consumo energetico per riscaldamento dell'ordine del 50%, imputabile soprattutto all'effetto delle condotte sotterranee [125].

Si ricorda come la presenza di canali sotterranei comporti un maggiore rischio di contaminazione microbiologica dell'aria di mandata, a causa delle difficoltà associate alla pulizia dei canali stessi. Di conseguenza, l'implementazione di tali configurazioni deve essere accompagnata da un preciso piano di gestione e manutenzione che assicuri una perfetta igiene di tutte le condotte e di tutti i dispositivi di ventilazione.

Un secondo esempio di riqualificazione di un edificio esistente è rappresentato dalla "Primary School Hötting", situata ad Innsbruck. Qui, a fronte di alcuni problemi di qualità dell'aria e di comfort termico, è stato sviluppato un nuovo concetto di ventilazione, riprodotto schematicamente in Figura 1.71.

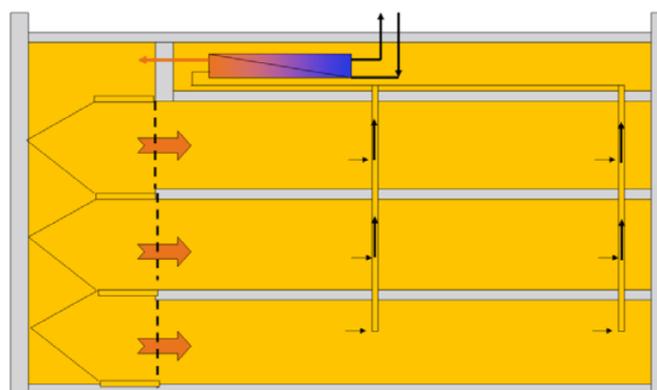


Figura 1.71. Sezione trasversale del nuovo concetto di ventilazione implementato [128]

Esso consiste in un sistema di ventilazione meccanica nel quale il recupero termico viene assicurato da uno scambiatore di calore in controcorrente a servizio di più classi. La principale differenza rispetto ad un

tipico impianto VMC risiede nell'assenza di canali verticali o orizzontali per la distribuzione dell'aria, in quanto sia il vano scala che i corridoi vengono utilizzati per veicolare il flusso d'aria verso gli ambienti occupati. In particolare, l'aria di rinnovo si riscalda nel sistema di recupero termico localizzato nel sottotetto, fluisce attraverso il vano scala e i corridoi e infine raggiunge le aule. Qui un diffusore in tessuto perforato con silenziatore e ventilatore, una cui rappresentazione è fornita in Figura 1.72, consente di distribuire uniformemente l'aria in tutto lo spazio occupato. L'aria esausta viene invece ripresa dai servizi igienici e dagli armadi e da qui convogliata nello scambiatore di calore.



Figura 1.72. Diffusore dell'aria in tessuto perforato con silenziatore e ventilatore [128]

La movimentazione dell'aria può essere inoltre incentivata dall'apertura dei serramenti, a patto che i flussi in ingresso non siano in contrasto con la direzione della portata elaborata dall'impianto.

La strategia di controllo prevede l'utilizzo di sensori di CO₂ e di presenza: se la concentrazione di CO₂ nel corridoio sale, la portata d'aria elaborata dal ventilatore centrale a servizio dello scambiatore aumenta, al fine di mantenerla costante ad un valore di circa 600 ppm. L'impianto entra in funzione un'ora prima dell'inizio delle lezioni e viene disattivato automaticamente da sensori di controllo della presenza.

Il principale svantaggio di tale strategia è rappresentato dalla minor efficienza di ventilazione rispetto ad una soluzione VMC standard, a causa della miscelazione parziale tra l'aria di ripresa e di mandata nel corridoio.

1.6) Bibliografia

- [1] L. Stabile, M. Dell'Isola, A. Frattolillo, A. Massimo, A. Russi, *Effect of natural ventilation and manual airing on indoor air quality in naturally ventilated Italian classrooms*, Build. Environ. 98 (2016) 180-189.
- [2] P. Wargocki, D.P. Wyon, *Providing better thermal and air quality conditions in school classrooms would be cost-effective*, Build. Environ. 59 (2013) 581-589.
- [3] Richard Daniels, *Building Bulletin 101, Guidelines on ventilation, thermal comfort and indoor air quality in schools*, Version 1, August 2018.
- [4] Omer AM. *Renewable building energy systems and passive human comfort solutions*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 12(6) (2008) 1562-1587.
- [5] O. Seppänen, W.J. Fisk, *Association of ventilation system type with SBS symptoms in office workers*, Indoor air 12 (2002) 98-112.
- [6] UNI 10339 (1995). *Impianti aeraulici ai fini di benessere. Generalità, classificazione e requisiti. Regole per la richiesta d'offerta, l'offerta, l'ordine e la fornitura*. Ente Nazionale Italiano di Unificazione, Milano.
- [7] UNI EN 16798-1 (2019). *Prestazione energetica degli edifici - Ventilazione per gli edifici - Parte 1: Parametri di ingresso dell'ambiente interno per la progettazione e la valutazione della prestazione energetica degli edifici in relazione alla qualità dell'aria interna, all'ambiente termico, all'illuminazione e all'acustica - Modulo M1-6*. Ente Nazionale Italiano di Unificazione, Milano.
- [8] Ministro dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare (2017). *Decreto 11 ottobre 2017: Criteri ambientali minimi per l'affidamento di servizi di progettazione e lavori per la nuova costruzione, ristrutturazione e manutenzione di edifici pubblici*. In G.U. 6 novembre 2017, n. 259.
- [9] M. Santamouris, A. Synnefa, M. Assimakopoulos, I. Livada, K. Pavlou, M. Papaglastra, N. Gaitani, D. Kolokotsa, V. Assimakopoulos, *Experimental investigation of the air flow and indoor carbon dioxide concentration in classroom with intermittent natural ventilation*, Energy Build. 40 (2008) 1833-1843.
- [10] Sundell J, Levin H, Nararoff WW, Cain WS, Fisk WJ, Grimsrud DT, et al. *Ventilation rates and health: multidisciplinary review of the scientific literature*, Indoor Air, 21(3) (2011) 191-204.
- [11] American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (2003), *ANSI/ASHRAE Standard 62-2001: Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality*.
- [12] British Standards Institution, *BS 5925: 1991: Code of practice for ventilation principles and designing for natural ventilation*, London, 1991.
- [13] Chartered Institution of Building Services Engineers, *Environmental design CIBSE Guide A*, London, 2006.
- [14] International Energy Agency, *Ventilative Cooling Design Guide*, Energy in Buildings and Communities Programme, 2018.
- [15] <https://www.agenziacasaclima.it/it/certificazionesostenibilita/casaclimaschool-1553.html>

- [16] Martin W Liddament, *A Guide to Energy Efficient Ventilation*, Air Infiltration and Ventilation Centre, 1996.
- [17] Maite Gil-Baez, Angela Barrios-Padura, Marta Molina-Huelva, R. Chacartegui, *Natural ventilation systems in 21st-century for near zero energy school buildings*, *Energy* 137 (2017) 1186-1200.
- [18] D.A. Krawczyk, A. Rodero, K. Gładyszewska-Fiedoruk, A. Gajewski, *CO₂ concentration in naturally ventilated classrooms located in different climates—Measurements and simulations*, *Energy and Buildings*, 129 (2016) 491-498.
- [19] Presidente della Repubblica (1996). *Legge 11 gennaio 1996, n. 23. Norme per l'edilizia scolastica*. In G.U. 19 gennaio 1996, n. 15.
- [20] Chartered Institution of Building Services Engineers, *Ventilation and ductwork CIBSE Guide B2*, London, 2016.
- [21] Chartered Institution of Building Services Engineers, *Natural ventilation in non-domestic buildings CIBSE Applications Manual AM10*, London, 2005.
- [22] C. Heracleous, A. Micahel, *Experimental assessment of the impact of natural ventilation on indoor air quality and thermal comfort conditions of educational buildings in the Eastern Mediterranean region during the heating period*, *Journal of Building Engineering*, Volume 26, (2019) 100917.
- [23] Chartered Institution of Building Services Engineers, *Daylighting and window design CIBSE Lighting Guide LG10*, London, 1999.
- [24] Per Heiselberg, *Design of Natural and Hybrid Ventilation*, 2006.
- [25] S. Steiger, U. Wellisch, R. Hellwig, *Untersuchung der Eignung verschiedener Fassaden für automatisierte Fensterlüftung in Schulen mit einem Entscheidungsbaumverfahren*, Sonderdruck aus: *Bauphysik* 32 (2010), Heft 4, Seite 253 – 262.
- [26] F. Ruan, N. Li, J. Long, *Calculation and assessing natural ventilation in a single opening office room with different windows in the regime of hot summer and cold winter*, 2012.
- [27] G. von Grabe, P. Svoboda, A. Bäumler, *Window ventilation efficiency in the case of buoyancy ventilation*, *Energy and Buildings*, 72 (2014) 203-211.
- [28] J. Wang, T. Zhang, S. Wang, F. Battaglia, *Numerical investigation of single-sided natural ventilation driven by buoyancy and wind through variable window configurations*, *Energy and Buildings*, 168 (2018) 147-164.
- [29] H. Wang, P. Karava, and Q. Chen, *Development of simple semi-empirical models for calculating airflow through hopper, awning, and casement windows for single-sided natural ventilation*, *Energy and Buildings*, 96 (2015) 373-384.
- [30] Fraunhofer-Institut für Bauphysik, S. Steiger, R. T. Hellwig, *Hybride Lüftungssysteme für Schulen*, Abschlussbericht zum Förderkennzeichen AZ 0327387A, 2011.

- [31] UNI EN 13030 (2005), *Ventilazione degli edifici - Terminali d'aria - Prove di prestazione di griglie sottoposte a simulazione di pioggia*, Ente Nazionale Italiano di Unificazione, Milano.
- [32] R. Daniels, *Guidelines on ventilation, indoor air quality and thermal comfort for schools, Launch of revised Building Bulletin (BB)101*, Department for Education, 2018.
- [33] J. Wang, S. Wang, T. Zhang, F. Battaglia, *Assessment of single-sided natural ventilation driven by buoyancy forces through variable window configurations*, Energy and Buildings, 139 (2017) 762-779.
- [34] *Integrated environmental solutions, Macroflo calculations methods*.
- [35] Chartered Institution of Building Services Engineers, *Ventilation and air conditioning CIBSE Guide B2*, London, 2001.
- [36] GJ Levermore, *The exponential limit to the cooling of buildings by natural ventilation*, Building Serv. Eng. Res. Technol. 23,2 (2002) pp. 119–125.
- [37] C. Zhang, T. Yu, P. Heiselberg, M. Pomianowski, P. Nielsen, *Diffuse Ceiling Ventilation: design guide*, Aalborg Universitet, 2016.
- [38] <https://www.qaes.it/deliverables>
- [39] Agenzia per l'Energia Alto Adige - CasaCima, *CasaClima Special Webinars, Introduzione agli impianti aeraulici per edifici nuovi e risanati*.
- [40] https://library.e.abb.com/public/2dc59a5d064be09ac1256d280041ce1a/AD3_IT_REVB2003.pdf
- [41] Università degli Studi di Padova, Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione, *Modellistica e controllo di un sistema di condizionamento di tipo VAV* (2011).
- [42] UNI CEN/TR 16798-4 (2018). *Prestazione energetica degli edifici - Ventilazione per gli edifici - Parte 4: Interpretazione dei requisiti nella EN 16798-3 - per gli edifici non residenziali - Requisiti di prestazione per i sistemi di ventilazione e condizionamento degli ambienti (Moduli M5-1, M5-4)*. Ente Nazionale Italiano di Unificazione, Milano.
- [43] UNI EN 16798-3 (2018). *Prestazione energetica degli edifici - Ventilazione per gli edifici - Parte 3: Per gli edifici non residenziali - Requisiti prestazionali per i sistemi di ventilazione e di condizionamento degli ambienti (Moduli M5-1, M5-4)*. Ente Nazionale Italiano di Unificazione, Milano.
- [44] Commissione Europea (2014), *REGOLAMENTO (UE) N. 1253/2014 DELLA COMMISSIONE del 7 luglio 2014 recante attuazione della direttiva 2009/125/CE del Parlamento europeo e del Consiglio per quanto riguarda le specifiche per la progettazione ecocompatibile delle unità di ventilazione*. Gazzetta Ufficiale dell'Unione Europea.
- [45] <https://www.agenziacasaclima.it/it/direttiva-tecnica-nuovi-edifici-settembre-2017--10-1205.html>
- [46] American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (2017), *ANSI/ASHRAE Standard 52.2-2017: Method of Testing General Ventilation Air-Cleaning Devices for Removal Efficiency by Particle Size*.
- [47] H. E. Burroughs, C. Muller, W. Yao, Q. Yu, *An Evaluation of Filtration and Air Cleaning Equipment Performance in Existing Installations with Regard to Acceptable IAQ Attainment*, Conference Paper in

Lecture Notes in Electrical Engineering (2014).

[48] T. Ruan, D. Rim, *Indoor air pollution in office buildings in mega-cities: Effects of filtration efficiency and outdoor air ventilation rates*, Sustainable Cities and Society, Volume 49, August 2019, 101609.

[49] J. Fletcher, *Ventilation control and traffic pollution*, BSRIA TN5/98 (Bracknell: Building Services Research and Information Association) (1998).

[50] M. Ward and J.A. Siegel, *Filter bypass: Implications for filter efficiency*, ASHRAE Transactions 111:1091–100, 2005.

[51] UNI EN ISO 16890-1 (2017). *Filtri d'aria per ventilazione generale - Parte 1: Specifiche tecniche, requisiti e sistema di classificazione dell'efficienza basato sul particolato (ePM)*. Ente Nazionale Italiano di Unificazione, Milano.

[52] UNI EN 779 (2012). *Filtri d'aria antipolvere per ventilazione generale - Determinazione della prestazione di filtrazione*. Ente Nazionale Italiano di Unificazione, Milano.

[53] World Health Organization (2010). WHO guidelines for indoor air quality: selected pollutants.

[54] UNI EN 13779 (2008). *Ventilazione degli edifici non residenziali - Requisiti di prestazione per i sistemi di ventilazione e di climatizzazione*. Ente Nazionale Italiano di Unificazione, Milano.

[55] Ministero della Salute (2001). *Linee Guida per la Definizione di Protocolli Tecnici di Manutenzione Predittiva sugli Impianti di Climatizzazione*.

[56] American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (2017). *ANSI/ASHRAE Standard 111-2008 (R2017): Measurement, Testing, Adjusting, And Balancing Of Building HVAC Systems*.

[57] UNI EN 1366-2 (2015). *Prove di resistenza al fuoco per impianti di fornitura servizi - Parte 2: Serrande tagliafuoco*. Ente Nazionale Italiano di Unificazione, Milano.

[58] UNI EN 13501-3 (2009). *Classificazione al fuoco dei prodotti e degli elementi da costruzione - Parte 3: Classificazione in base ai risultati delle prove di resistenza al fuoco dei prodotti e degli elementi impiegati in impianti di fornitura servizi: condotte e serrande resistenti al fuoco*. Ente Nazionale Italiano di Unificazione, Milano.

[59] UNI EN 15650 (2010). *Ventilazione degli edifici - Serrande tagliafuoco*. Ente Nazionale Italiano di Unificazione, Milano.

[60] UNI EN 1366-1 (2014). *Prove di resistenza al fuoco per impianti di fornitura servizi - Parte 1: Condotte di ventilazione*. Ente Nazionale Italiano di Unificazione, Milano.

[61] UNI EN 1363-1 (2020). *Prove di resistenza al fuoco - Parte 1: Requisiti generali*. Ente Nazionale Italiano di Unificazione, Milano.

[62] UNI EN 1366-8 (2005). *Prove di resistenza al fuoco per impianti di fornitura servizi - Parte 8: Condotte di estrazione fumo*. Ente Nazionale Italiano di Unificazione, Milano.

[63] UNI EN 12237 (2004). *Ventilazione degli edifici - Reti delle condotte - Resistenza e tenuta delle condotte circolari di lamiera metallica*. Ente Nazionale Italiano di Unificazione, Milano.

[64] UNI EN 1507 (2008). *Ventilazione degli edifici - Condotte rettangolari di lamiera metallica - Requisiti di resistenza e di tenuta*. Ente Nazionale Italiano di Unificazione, Milano.

- [65] Chartered Institution of Building Services Engineers, *Environmental design CIBSE Guide A*, London, 2006.
- [66] UNI EN ISO 12241 (2009). *Isolamento termico per gli impianti negli edifici e per le installazioni industriali - Metodi di calcolo*. Ente Nazionale Italiano di Unificazione, Milano.
- [67] UNI EN ISO 7730 (2006). *Ergonomia degli ambienti termici - Determinazione analitica e interpretazione del benessere termico mediante il calcolo degli indici PMV e PPD e dei criteri di benessere termico locale*. Ente Nazionale Italiano di Unificazione, Milano.
- [68] <https://www.sagicofim.com/product-category/diffusione-aria/>
- [69] B. Yang et al., *A review of advanced air distribution methods - theory, practice, limitations and solutions*, Energy & Buildings 202 (2019) 109359.
- [70] C. Zhang, P. Heiselberg, P. V. Nielsen, *Diffuse Ceiling Ventilation - A Review*, International Journal of Ventilation ISSN 1473-3315 Volume 13 No 1 June 2014.
- [71] <http://www.lucaferrari.info/wp-content/uploads/2016/04/Sistemi-di-diffusione-dellaria-nelle-scuole-RCI4apr16.pdf>
- [72] Collana AiCARR, *Le nuove frontiere della climatizzazione: ventilazione a dislocamento in ambienti non industriali*. Dario Flaccovio Editore.
- [73] C. Zhang, M.H. Kristensen, J.S. Jensen, P.K. Heiselberg, R.L. Jensen, M. Pomi-anowski, *Parametrical analysis on the diffuse ceiling ventilation by experimental and numerical studies*, Energy Build. 111 (2016) 87–97.
- [74] W. Wu et al., *Diffuse ceiling ventilation for buildings: A review of fundamental theories and research methodologies*, Journal of Cleaner Production, 211 (2019) 1600-1619.
- [75] C.A. Hviid, S. Svendsen, *Experimental study of perforated suspended ceilings as diffuse ventilation air inlets*, Energy Build. 56 (Jan) (2013) 160–168.
- [76] T. Yu, P. Heiselberg, B. Lei, M. IPomianowski, C. Zhang, *A novel system solution for cooling and ventilation in office buildings: A review of applied technologies and a case study*, Energy and Buildings, Volume 90, 1 March 2015, Pages 142-155.
- [77] T. Yao, Z. Lin, *An experimental and numerical study on the effect of air terminal types on the performance of stratum ventilation*, Building and Environment, Volume 82, (2014) 431-441.
- [78] H. Yin, A. Li, *Design Principle of Air Curtain Ventilation*, Lecture Notes in Electrical Engineering, January 2014.
- [79] UNI EN 308 (1998). *Scambiatori di calore - Procedimenti di prova per stabilire le prestazioni dei recuperatori di calore aria/aria e aria/gas*. Ente Nazionale Italiano di Unificazione, Milano.
- [80] UNI EN 13141-7 (2011). *Ventilazione degli edifici - Verifica delle prestazioni di componenti/ prodotti per la ventilazione degli alloggi - Parte 7: Verifica delle prestazioni di unità di ventilazione meccanica di immissione ed estrazione (compreso il recupero di calore) di impianti di ventilazione meccanica destinati ad abitazioni unifamiliari*. Ente Nazionale Italiano di Unificazione, Milano.

- [81] K.W.Cheong, Airflow measurements for balancing of air distribution system — tracer-gas technique as an alternative?, *Building and Environment*, Volume 36 (2001) Pages 955-964.
- [82] UNI EN 12599 (2012). *Ventilazione per edifici - Procedure di prova e metodi di misurazione per la presa in consegna di impianti di ventilazione e di condizionamento dell'aria*. Ente Nazionale Italiano di Unificazione, Milano.
- [83] <http://www.idealclima.eu/it/area-tecnica/il-bilanciamento-di-una-rete-vmc>
- [84] F. Pedranzini, L. P.M. Colombo, C. M. Joppolo, *A non-iterative method for Testing, Adjusting and Balancing (TAB) air ducts systems: Theory, practical procedure and validation*, *Energy and Buildings* 65 (2013) 322–330.
- [85] M. B. Schell, S. C. Turner, R. O. Shim, *Application of CO₂-Based Demand-Controlled Ventilation Using ASHRAE Standard 62: Optimizing Energy Use and Ventilation*, TO-98-21-1.
- [86] T. Lu, X. Lu, M. Viljanen, A novel and dynamic demand-controlled ventilation strategy for CO₂ control and energy saving in buildings, *Energy and Buildings* 43 (2011) 2499–2508.
- [87] N. Nassif, *A robust CO₂-based demand-controlled ventilation control strategy for multi-zone HVAC systems*, *Energy and Buildings* 45 (2012) 72–81.
- [88] G. Pei, D. Rim and S. Schiavon et al., *Effect of sensor position on the performance of CO₂-based demand-controlled ventilation*, *Energy & Buildings* 202 (2019) 109358.
- [89] Meyn, S.P., A. Surana, Y. Lin, S. M. Oggianu, S. Narayanan, and T. Frewen. 2009. *A Sensor-Utility-network Method for Estimation of Occupancy Distribution in Buildings*, In Proceedings of the 48th IEEE Conference on Decision and Control, Shanghai, China, December 15-18, 2009. Institute of Electrical and Electronic Engineers, New York.
- [90] M. Mysen, S. Berntsen, P. Nafstad, P. G. Schild, *Occupancy density and benefits of demand-controlled ventilation in Norwegian primary schools*, *Energy and Buildings* 37 (2005) 1234–1240.
- [91] L. Schibuola, M. Scarpa, C. Tambani, *CO₂ based ventilation control in energy retrofit: An experimental assessment*, *Energy* 143 (2018) 606-614.
- [92] Chartered Institution of Building Services Engineers, *Building control system CIBSE Guide H*, London, 2009.
- [93] UNI 11367 (2010). *Acustica in edilizia - Classificazione acustica delle unità immobiliari - Procedura di valutazione e verifica in opera*. Ente Nazionale Italiano di Unificazione, Milano.
- [94] Ispesl, Conferenza dei Presidenti delle Regioni e delle Provincie Autonome, Scheda 21: Propagazione del rumore nelle condotte d'aria.
- [95] AIA, Associazione Italiana di Acustica, *Linee Guida per una Corretta Progettazione Acustica di Ambienti Scolastici*.
- [96] REGOLAMENTO (CE) N. 1272/2008 DEL PARLAMENTO EUROPEO E DEL CONSIGLIO del 16 dicembre 2008, *Gazzetta Ufficiale dell'Unione Europea*, L 353/1.
- [97] AERMEC, *Nozioni di aeraulica*, edizione 03/2002.

- [98] UNI EN ISO 12354-4 (2017). *Acustica in edilizia - Valutazioni delle prestazioni acustiche di edifici a partire dalle prestazioni dei prodotti - Parte 4: Trasmissione del rumore interno all'esterno*. Ente Nazionale Italiano di Unificazione, Milano.
- [99] UNI EN 12097 (2007). *Ventilazione degli edifici - Rete delle condotte - Requisiti relativi ai componenti atti a facilitare la manutenzione delle reti delle condotte*. Ente Nazionale Italiano di Unificazione, Milano.
- [100] UNI EN 16798-17 (2018). *Prestazione energetica degli edifici - Ventilazione per gli edifici - Parte 17: Linee guida per l'ispezione degli impianti di ventilazione e condizionamento dell'aria (Modulo M4-11, M5-11, M6-11, M7-11)*. Ente Nazionale Italiano di Unificazione, Milano.
- [101] Ministero della Salute, Dipartimento della Prevenzione e Comunicazione, Direzione Generale della Prevenzione Sanitaria, Schema di Linee Guida per la definizione di protocolli tecnici di manutenzione predittiva sugli impianti di climatizzazione.
- [102] UNI EN 15780 (2011). *Ventilazione degli edifici - Condotti - Pulizia dei sistemi di ventilazione*. Ente Nazionale Italiano di Unificazione, Milano.
- [103] P. Pasanen et al., *Cleanliness of ventilation systems - a REHVA guidebook*, Proceedings of Clima 2007 WellBeing Indoors.
- [104] Chartered Institution of Building Services Engineers, *Hygienic maintenance of office ventilation ductwork*, CIBSE TM26: 2000.
- [105] AiCARR, *Protocollo per la riduzione del rischio di diffusione del SARS-CoV-2 nelle operazioni di gestione e manutenzione degli impianti di climatizzazione e ventilazione esistenti*, 2020.
- [106] <https://www.ilsole24ore.com/art/ioni-luce-uv-plasma-freddo-tutti-sistemi-sanificare-ambienti-AD00Z0L>
- [107] ASHRAE, *2019 ASHRAE Handbook—HVAC Applications*, CHAPTER 62: ultraviolet air and surface treatment.
- [108] Kujundzic, E., M. Hernandez, and S.L. Miller. 2007. *Ultraviolet germicidal irradiation inactivation of airborne fungal spores and bacteria in upperroom air and HVAC in-duct configurations*. Journal of Environmental Engineering Science 6:1-9.
- [109] ASHRAE, *Indoor Air Quality Guide: Best Practices for Design, Construction and Commissioning*, 2009.
- [110] https://www.lightprogress.it/it/blog/covid-19-soluzioni-light-progress-per-la-disinfezione-uv-c-utili-in-questo-momento-di-crisi_9.html
- [111] http://www.aicarr.org/Documents/News/200318_SCHEMA_GESTIONE_HVAC_SARSCoV219_DEF.pdf
- [112] https://www.aicarr.org/Documents/Normativa/COVID19/AJ61_HVAC_COVID19.pdf
- [113] <https://eurovent.me/sites/default/files/field/file/EME-GEN%20-%2020004.00%20-%20COVID-19%20Recommendations%20for%20Air%20Filtration%20and%20Ventilation.pdf>
- [114] https://www.aicarr.org/Documents/News/200313_AICARR_SARSCOV2_19.pdf

- [115] Per Heiselberg, *Principles of Hybrid Ventilation*, Aalborg University, Aalborg, Denmark, 2002.
- [116] S. Steiger, J. Karsten Roth, L. Ostergaard, *Hybrid ventilation - the ventilation concept in the future school buildings?*, AIVC Conference Paper, 2012.
- [117] J. Sowa, A. Karaś, *Whole year simulation of natural and hybrid ventilation performance and estimation indoor air quality for modernized school building*, Proceedings of Clima 2007 WellBeing Indoors, 1-8.
- [118] J. C. Salcido, A. A. Raheem, R. R.A. Issa, *From simulation to monitoring: Evaluating the potential of mixed-mode ventilation (MMV) systems for integrating natural ventilation in office buildings through a comprehensive literature review*, Energy and Buildings 127 (2016) 1008–1018.
- [119] J. Heinonen, R. Kosonen, *Hybrid Ventilation Concepts in Commercial Buildings - Indoor Air Quality and Energy Economy Perspective*, Proceedings of the Healthy Buildings 2000, Vol. 2.
- [120] Z. B. Brown, H. Dowlatabadi, R. J. Cole, *Feedback and adaptive behaviour in green buildings*, Intelligent Buildings International, 2009.
- [121] S. Darby, *The effectiveness of feedback on energy consumption: a review for defra of the literature on metering, billing and direct displays*, Environmental Change Institute, University of Oxford, 2006.
- [122] S. Ray, A. Menchana, L. Glicksman, N. Ochiai, *Overview of Hybrid Ventilation Control System and Full-Scale Monitoring*, 2015.
- [123] K. Ackerly, L. Baker, G. Brager, *Window Use in Mixed-Mode Buildings: A literature Review*, Center for the Built Environment, 2011.
- [124] M. Orme, *AIVC Technical Note 51: Applicable Models for Air Infiltration and Ventilation Calculations*, AIVC, Coventry, UK.
- [125] A. Delsante, T. A. Vik, *Annex 35: Hybrid Ventilation in New and Retrofitted Office Buildings*, IEA.
- [126] <http://www.co2-modell.nlga.niedersachsen.de/>
- [127] UNI 11532-2 (2020). *Caratteristiche acustiche interne di ambienti confinati - Metodi di progettazione e tecniche di valutazione - Parte 2: Settore scolastico*. Ente Nazionale Italiano di Unificazione, Milano.
- [128] European Commission, DG Research and Innovation, *D 6.2 Documentation of each study case CS5 Primary School Hötting, Innsbruck (Austria) Delivered at M42*.

2) Materiali e prodotti basso emissivi, tecniche di inibizione delle emissioni, pulizia e prodotti per l'igiene

Se una corretta ed efficace ventilazione è una misura indispensabile per garantire la qualità dell'aria all'interno dei locali scolastici, altrettanto importante è l'eliminazione e il contenimento delle possibili fonti interne di inquinamento. Materiali da costruzione e per finiture interne, arredamenti, prodotti di pulizia, ma anche attrezzature elettroniche come fotocopiatrici e stampanti e lo stesso materiale scolastico possono rilasciare contaminanti in quantità più o meno elevate a seconda delle rispettive caratteristiche di emissione. Fra i principali inquinanti rilevabili negli edifici scolastici si contano i composti organici volatili (VOC), per alcuni dei quali è stata accertata la pericolosità per la salute dell'uomo, come la formaldeide, il benzene e il toluene, e altri apparentemente inoffensivi. Anche i secondi, tuttavia, possono reagire in determinate condizioni ambientali, dando luogo a prodotti secondari ben più pericolosi rispetto ai reagenti iniziali. Un esempio è rappresentato dai terpeni emessi dai prodotti a base di legno che, in presenza di elevati livelli di ozono, possono reagire formando formaldeide. In entrambi i casi, un'elevata concentrazione di queste sostanze può avere un impatto più o meno importante sulla salute degli studenti, dando luogo ad un calo della produttività e ad un incremento dell'assenteismo. Per porre rimedio a tali fenomeni è quindi importante utilizzare materiali basso emissivi e attuare delle tecniche di pulizia che minimizzino gli effetti negativi sulla qualità dell'aria interna. Ciò nonostante, alcune attività associate alla costruzione e alla conduzione dell'edificio potrebbero alterare il comportamento dei materiali o rappresentare esse stesse delle fonti di inquinamento: in tali circostanze, si suggerisce di adottare dei metodi di inibizione delle emissioni e delle strategie di ventilazione che intervengano direttamente sulla sorgente inquinante.

La presente trattazione è stata quindi suddivisa in tre sezioni principali:

- **criteri per la selezione di materiali basso emissivi** in funzione della categoria di appartenenza, con focus sui relativi label/marchi di qualità;
- **analisi delle tecniche disponibili per minimizzare l'impatto delle emissioni di contaminanti sulla qualità dell'aria interna;**
- **gestione delle operazioni di pulizia, comprese le fasi di selezione, utilizzo e stoccaggio dei prodotti detergenti e disinfettanti.**

A ciascuna sezione corrisponde un insieme di azioni volte a migliorare la qualità dell'aria interna. Questi interventi, indipendentemente dalla loro natura, dovrebbero riguardare tutte le porzioni dell'edificio soggette al rilascio di inquinanti. Ad esempio, se a valle di un processo di misura venisse riscontrata una concentrazione elevata di un certo contaminante, sarebbe necessario risalire a tutte le possibili fonti per inibirne al più presto le emissioni.

In Tabella 2.1 viene proposta una panoramica dei principali inquinanti presenti negli spazi indoor e delle relative sorgenti, che può fungere da primo strumento di diagnosi per individuare i materiali, i prodotti e/o le parti di edificio su cui intervenire.

Tabella 2.1. *Principali inquinanti emessi dai materiali e dai prodotti utilizzati all'interno degli edifici scolastici*

Fonti di emissione	Inquinanti
Materiali da costruzione e isolanti	amianto, fibre vetrose e minerali, particolato, radon, agenti biologici (per presenza di umidità e/o polvere), VOC, formaldeide
Materiali di rivestimento e moquette	formaldeide, ftalati (SVOC), altri VOC, agenti biologici (per presenza di umidità e/o polvere)
Arredi e pavimentazioni	formaldeide, benzene, altri VOC, agenti biologici (per presenza di umidità e/o polvere)
Collanti, pitture, sigillanti, adesivi, vernici	formaldeide, benzene, altri VOC
Vernici resistenti all'acqua	benzene, toluene, ethylbenzene, xylene, altri VOC
Pannelli fonoassorbenti	VOC, formaldeide
Prodotti per le pulizie, deodoranti, detergenti e disinfettanti	VOC, pesticidi, particolato, idrocarburi policiclici aromatici (IPA)
Pennarelli a secco e prodotti di cancelleria	VOC, formaldeide
Tessuti	formaldeide, organofosfati, acari della polvere
Sorgenti naturali (lave, tufi, graniti, ecc..)	radon
Fotocopiatrici	ozono (O ₃), polvere di toner, idrocarburi volatili (VOC)

Si sottolinea come l'utilizzo di materiali a basse emissioni rappresenti non solo il presupposto fondamentale per un ambiente interno salubre, ma anche un mezzo per contenere i costi energetici dell'edificio. In questo modo, infatti, il sistema di ventilazione può essere dimensionato sulla base di una portata di progetto inferiore, funzione dell'occupazione e del comfort termico.

2.1) Selezione di materiali e prodotti basso emissivi

Dall'analisi di Tabella 2.1 traspare in modo evidente come una parte importante delle emissioni provenienti dai materiali interni sia costituita dai composti organici, suddivisibili in volatili (VOC), semi-volatili (SVOC) e molto volatili (VVOC). Sebbene i primi siano quelli più pericolosi, anche i secondi possono rivelarsi cancerogeni o dannosi per la IAQ: è il caso dei plastificanti come ftalati, pesticidi e ritardanti di fiamma organofosfati. Le principali fonti di emissione consistono nelle vernici e pitture, nei rivestimenti, nelle pavimentazioni e nelle moquette. Per ulteriori approfondimenti circa gli inquinanti e le loro caratteristiche si rimanda ai report sviluppati nell'ambito del progetto QAES [1].

È importante sottolineare come il dato relativo alla concentrazione/emissione di VOC totali (TVOC) non sia rappresentativo dell'effettiva qualità dell'aria interna, poiché esso dipende fortemente dal metodo di misura adottato e dal numero di composti contemplati dalla misura stessa, come riportato da diversi autori [2, 3]. Al fine di prevenire qualsiasi rischio legato alla salute degli occupanti, si rende dunque necessaria un'analisi dettagliata delle concentrazioni raggiunte dai diversi composti organici volatili presenti in ambiente, per verificare che essi rispettino i valori soglia previsti dalla legislazione vigente. Da qui **l'importanza di utilizzare dei prodotti che esprimano in modo chiaro i tassi di emissione relativi ai singoli VOC.**

Si presti inoltre attenzione all'impiego di tutti quei materiali che, sebbene non emettano sostanze considerate dannose per l'uomo, possono dar luogo a dei **composti secondari pericolosi** in presenza di determinate condizioni di esercizio. In Tabella 2.2. vengono forniti alcuni esempi di queste reazioni, specificandone il prodotto di partenza, i VOC formatesi e i reagenti coinvolti.

Tabella 2.2. *Composti organici secondari associati a reazioni tra prodotti e reagenti [4]*

Prodotto di partenza	VOC secondari	Reagenti
Tappeti e moquette a base di lana	aldeidi, formaldeide, benzotiazolo	ozono, calore
Materassini sottopavimento	acido acetico	acqua, azoto
Sughero	acido acetico, furfurolo	calore
Condotte rivestite	aldeidi	ozono
Rivestimenti di mobili	aldeidi, acrilati, stirene, terpeni	-
Linoleum	aldeidi	acqua
Vernici alchidiche	aldeidi, acidi grassi, terpeni	-
Vernici acriliche	aldeidi, formaldeide, acido formico	ozono
Primer a base di acqua	aldeidi (esanolo)	-
Attrezzature elettroniche	aldeidi, formaldeide	ozono
PVC	2-etilesanolo	acqua
Materiali isolanti	aldeidi	umidità
Prodotti a base di legno incollato	formaldeide	ozono
Schiume e resine melamminiche	formaldeide	ozono

Non a caso, **per ridurre l'impatto associato alle emissioni secondarie**, si consiglia di **minimizzare la concentrazione interna di ozono**, ad esempio attraverso sistemi di filtraggio a carboni attivi per l'aria esterna o mediante la rimozione degli NO_x prodotti da attività interne e di **limitare la presenza di umidità** e con essa le reazioni di idrolisi. Ciò nonostante, la strategia più efficace risiede nel **controllo delle sorgenti inquinanti**, attuabile con una selezione accurata dei prodotti utilizzati negli ambienti indoor.

Il rilascio di inquinanti da parte di un materiale può essere descritto sotto forma di un **tasso di emissione ER**, esprimibile mediante la seguente relazione:

$$ER = EF \cdot \text{unità di materiale} \quad [\mu\text{g}/\text{h}]$$

dove **EF** è il **fattore di emissione specifico** in $\mu\text{g}/\text{m}^2/\text{h}$ o in $\mu\text{g}/\text{prodotto}/\text{h}$ a seconda che il materiale sia composito od omogeneo. Ne deriva che l'unità di materiale che compare nella formula possa essere inteso sia come numeri di unità di prodotto che come m^2 di superficie emittente a contatto con l'aria interna.

Il **fattore di emissione non è un parametro costante nel tempo**: ad esempio, soprattutto per vernici, sigillanti e adesivi, assume valori elevati nel periodo immediatamente successivo al completamento dei lavori, per poi diminuire fino ad annullarsi in funzione della quantità residua di inquinanti presenti nel prodotto [5]. In Figura 2.1 (a sinistra), ricavata dal software IA-Quest [6], si vede chiaramente come l'emissione di TVOC associata ad una vernice a base solvente tenda a zero molto rapidamente.

Un qualsiasi prodotto, dunque, a seconda delle dosi iniziali di contaminanti e della velocità di decadimento degli stessi, può essere definito come **una sorgente a breve o a lungo termine**. È opportuno precisare come la formaldeide, rispetto alla stragrande maggioranza dei VOC, sia caratterizzata da un'emissione pressoché costante nel tempo e ciò giustifica la grande attenzione da riporre nella scelta e nel trattamento dei materiali contenenti tale sostanza, come i pannelli e gli arredi a base di legno incollato. Questo fenomeno viene mostrato in Figura 2.1 (a destra) per un pannello di fibre a media densità.

Il **parametro ER dipende fortemente dalle condizioni termo-igrometriche interne**: all'aumentare della **temperatura e dell'umidità relativa**, aumenta il rilascio di composti organici volatili. Anche le caratteristiche di posa incidono prepotentemente sul comportamento emissivo dei prodotti edilizi: in particolare, quelli applicati ancora bagnati, come rivestimenti, adesivi e stucchi, sono contraddistinti, inizialmente, da tassi di emissione elevati e controllati dalla velocità dell'aria, mentre per i materiali secchi si evidenzia un rilascio di inquinanti relativamente lento e indipendente dalla velocità dell'aria.

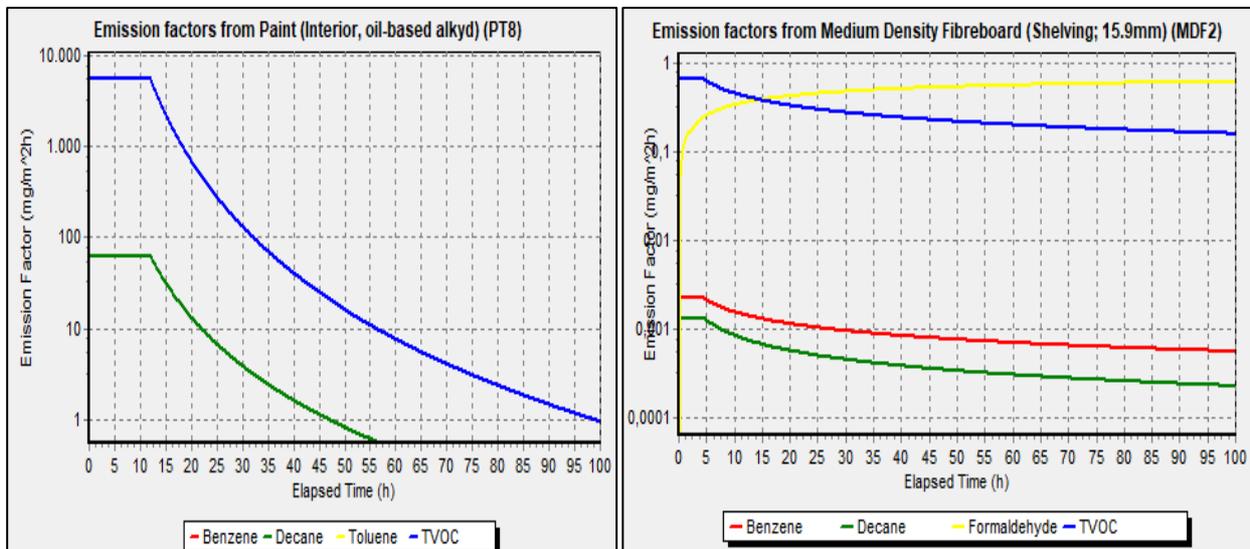


Figura 2.1. Emissioni di TVOC e di altri inquinanti (in scala logaritmica) per una vernice a base solvente (a sinistra) e per un pannello MDF (a destra) [6]

Maggiore attenzione deve essere riposta sui materiali compositi (come pannelli a base di legno incollato) e su sistemi formati da più componenti (come pavimentazioni e moquette), il cui comportamento emissivo è ben diverso da quello dei singoli elementi. Di conseguenza, si consiglia di eseguire dei test di emissione sull'intero sistema e non solo sui componenti. Ulteriori test andrebbero effettuati nel caso in cui si intenda sottoporre il materiale, in fase d'installazione, a lavorazioni particolari; infatti, è ben noto che i tassi di emissione aumentano notevolmente in presenza di un foro o di una zona tagliata, a causa della maggiore superficie emissiva. Per limitare questo problema, è possibile applicare dei sigillanti o dei sistemi di tenuta in corrispondenza del punto in cui è avvenuta la modifica. Si consiglia comunque di mantenere il prodotto il più intatto possibile, minimizzando le lavorazioni in fase d'installazione. In conclusione, nella scelta di materiali basso-emissivi, è **necessario assicurarsi che i test di emissione riflettano le effettive condizioni in cui tali materiali si troveranno a lavorare**.

Nella scelta di materiali o prodotti a basse emissioni si consiglia di fare affidamento ai label/marchi di qualità riconosciuti e disponibili sul mercato o, in alternativa, di richiedere le schede di sicurezza e i rapporti di prova sulle emissioni dei prodotti direttamente al fornitore/produttore.

I sistemi di etichettatura che forniscono informazioni circa l'impatto sull'IAQ dei prodotti da costruzione si distinguono in due grandi famiglie in funzione dei parametri sottoposti ad analisi:

- *emissions-based labels* (etichette EB): sono etichette basate sui risultati rilevati attraverso test di emissione effettuati in condizioni standard. Inizialmente, queste etichette erano solite indicare solo il tasso di emissione di TVOC, omettendo il contributo associato ai singoli composti organici volatili che, però, hanno impatti diversi sulla salute delle persone in funzione della concentrazione con cui essi si manifestano. Recentemente, importanti passi in avanti sono stati fatti per adeguare il sistema di etichettatura a requisiti più stringenti in termini di singoli VOC e SVOC.
- *content-based labels* (etichette CB): valutano l'impatto potenziale del materiale sulla base della percentuale in peso di composti organici volatili contenuti al suo interno, senza considerare l'effettivo fenomeno di emissione. In più, non tengono conto dell'importanza del fattore tempo: un dato elemento, infatti, può rilasciare contaminanti a basse velocità per un lungo periodo di tempo (*slow decaying*) o, viceversa, può emettere una gran quantità di inquinanti in un breve intervallo di tempo (*fast decaying*).

Le schede di sicurezza fornite dal produttore rappresentano la forma più semplice di etichetta CB, in quanto riportano solo la composizione chimica del prodotto e non danno informazioni circa le emissioni inquinanti dello stesso. Ciò nonostante, alcune restrizioni riguardanti l'impiego di materiali e prodotti sono ancora basate sul contenuto e non sull'emissione di sostanze contaminanti; è questo il caso dei prodotti liquidi applicati sulle superfici interne, come pitture e vernici, che, in conformità ai CAM edilizia [8] e alla Direttiva 2004/42/CE [7], devono soddisfare determinati vincoli circa il contenuto massimo di VOC e devono rispettare i valori limite di emissione a 28 giorni per diversi inquinanti, tra cui TVOC e formaldeide.

Abbiamo già osservato come le etichette CB non siano rappresentative del potenziale di inquinamento indoor di un dato materiale, pertanto non sono in grado di stimare il relativo impatto sul livello di IAQ richiesto. Allo stesso tempo, le etichette EB non permettono di prevedere il comportamento emissivo del prodotto al variare delle condizioni termo-igrometriche interne, né di stimarne l'andamento oltre un certo periodo di tempo, poiché i test vengono effettuati sotto condizioni standard che non sempre riflettono le reali condizioni di utilizzo. Ciò nonostante, le etichette EB trovano sempre più vasta applicazione nei label di qualità e sono molto utili per comparare tra loro prodotti diversi.

In particolare, i label/ marchi di qualità rappresentano degli strumenti volontari di certificazione dei prodotti rilasciati da organismi indipendenti, che, da un lato, indirizzano il consumatore verso acquisti a basso impatto ambientale e, dall'altro, incentivano al continuo miglioramento della filiera produttiva in un'ottica di sostenibilità. Molti di questi marchi sono conformi alla ISO 14024 e impongono degli standard di emissione di sostanze inquinanti ben più stringenti rispetto a quelli previsti dalle norme vigenti.

Secondo la classificazione introdotta dalla UNI EN ISO 14020 [9], le etichette e dichiarazioni ambientali di prodotto possono essere distinte in tre tipologie:

- etichette ambientali di tipo I (UNI EN ISO 14024 [10]): sono volontarie e sottoposte a certificazione esterna, da parte di un organismo competente che può essere pubblico o privato. Considerano l'intero ciclo di vita del prodotto, fissando dei valori soglia e dei limiti di prestazione ambientale da rispettare. Alcuni esempi sono EU Ecolabel, Green Seal, Nordic White Swan e The Blue Angel. I programmi di etichettatura ambientale di tipo I che operano in conformità alla ISO 14024 soddisfano quindi requisiti stringenti sia per quanto riguarda gli standard fissati e la rilevanza dei criteri di assegnazione, sia rispetto all'indipendenza dei loro sistemi di controllo e alla trasparenza dei loro processi di sviluppo e assegnazione.
- etichette ambientali di tipo II (UNI EN ISO 14021 [11]): note anche come autodichiarazioni ambientali, riportano informazioni stabilite da parte di produttori, importatori o distributori di prodotti, senza che vi sia l'intervento di un organismo indipendente di certificazione. Alcuni esempi sono il "Punto Verde" (in tedesco *Der Grüne Punkt* o *Grüner Punkt*) e indicazioni del tipo "Riciclabile" e "Compostabile";
- dichiarazioni ambientali di tipo III (UNI EN ISO 14025 [12]): conosciute con l'acronimo DAP o EPD (dall'inglese *Environmental Product Declaration*), sono dichiarazioni di prodotto che riportano informazioni basate su parametri prefissati, contenenti una quantificazione degli impatti ambientali associati al ciclo di vita del prodotto stesso e calcolati attraverso una procedura LCA. Le DAP/EPD sono sottoposte a un controllo indipendente da parte di organismo terzo accreditato e come tali contengono informazioni oggettive, confrontabili e credibili. Non definiscono tuttavia soglie prestazionali da rispettare e possono anche non riportare informazioni sulle emissioni inquinanti dei prodotti.

In alcuni stati europei sono inoltre in vigore dei provvedimenti legislativi che definiscono requisiti e standard obbligatori per le emissioni inquinanti dei prodotti da utilizzare all'interno degli edifici e che possono prevedere anche l'etichettatura obbligatoria degli stessi rispetto ai requisiti di qualità dell'aria, come avviene ad esempio in Francia. È importante sottolineare come label diversi possano contemplare nella loro valutazione categorie di prodotto differenti: ad esempio l'etichetta FloorScore è espressamente dedicata alla certificazione dei rivestimenti per pavimenti e non considera ulteriori tipologie come arredamenti e tessili, contemplati invece da EU Ecolabel o da The Blue Angel. Allo stesso tempo, ogni sistema può stabilire dei propri requisiti di emissione relativi ad una o più categorie di prodotto, attraverso la redazione di specifiche direttive. Pertanto:

- dato un certo label/marchio di qualità, categorie di prodotto diverse sono normalmente sottoposte a limiti di emissione diversi;
- data una certa categoria di prodotto, marchi diversi sono soliti imporre limiti di emissione diversi.

In Tabella 2.3 vengono riportate le caratteristiche dei label/ marchi più diffusi sul mercato internazionale ed europeo, distinti in funzione della tipologia di etichetta a cui appartengono, con un focus sulle categorie di prodotto da essi contemplati rispetto alle emissioni in ambiente indoor.

Tabella 2.3. *Caratteristiche dei più importanti sigilli di qualità dei materiali e dei prodotti edilizi (continua alla pagina successiva)*

Etichetta	Sigillo di qualità	Caratteristiche
CB label	EcoLogo	Nata in Canada dal “TerraChoice Environmental Marketing Inc”, conta più di 7000 prodotti certificati suddivisi in 120 categorie e pone dei limiti sul contenuto dei singoli VOC e delle restrizioni su alcune sostanze da non utilizzare.
CB label	Green Seal (ISO 14024)	Introdotta negli USA nel 1989, rappresenta il primo sistema americano di etichettatura. Non consente l’impiego di sostanze cancerogene o tossiche per la riproduzione e fissa dei limiti sul contenuto di VOCs.
CB label	Declare	Nata negli USA nel 2012 su iniziativa del “International Living Future Institute”, certifica i prodotti privi delle sostanze chimiche contenute nella “LBC Red List” e nella “REACH SVHC List”. Inoltre, richiede la conformità allo standard CDPH sul contenuto di VOC.
EB label	FloorScore	Sviluppato dall’istituto americano “Resilient Floor Covering Institute”, si concentra sulla certificazione dei rivestimenti per pavimenti, comprese le piastrelle, il linoleum e le gomme, fornendone i valori di emissione a 14 giorni.
EB label	Green Label Green Label Plus	Introdotta negli USA dal “Carpet and Rug Institute”, fornisce le emissioni a 24 ore di tappeti, moquette e dei relativi adesivi. Per le scuole, è possibile affidarsi all’etichetta Green Label Plus, che valuta le emissioni a 1 e 14 giorni e impone dei limiti più restrittivi.
EB label	Greenguard Greenguard Gold	Nasce negli USA dal “Greenguard Environmental Institute” come sistema di certificazione di 19 categorie di prodotto, tra cui sigillanti, adesivi, arredi, isolanti e tessili. La versione “Gold” prevede dei limiti di emissione più stringenti ed è espressamente rivolta alle scuole.
EB label	The Blue Angel (ISO 14024)	Nato nel 1977 in Germania, conta più di 4000 prodotti suddivisi in 80 categorie. Impone dei valori massimi di emissione a 1 giorno e a 28 giorni per pannelli a base di legno, pavimenti, adesivi, pitture, materiali isolanti e molti altri prodotti.
EB label	Indoor Climate Label	Fondato nel 1993 in Danimarca dal ministero per l’edilizia, definisce i requisiti di emissione dei materiali in termini di VOC, SVOC, sostanze cancerogene e rilascio di polveri e fibre e valuta l’impatto degli stessi in termini di odore e di irritazione nei confronti dell’uomo. Comprende una vasta gamma di prodotti tra cui arredi, pitture, tappeti e pavimenti.

EB label	M-1 Classification	Etichetta finlandese nata nel 1995, valuta i prodotti rispetto al loro impatto sulla qualità indoor e sulla salute. La classificazione definisce precisi limiti per le emissioni di VOC, formaldeide e ammoniaca e prevede test sull'accettabilità degli odori sprigionati dai materiali.
EB label	Natureplus (ISO 14024)	Nato in Germania, considera l'intero ciclo di vita dei prodotti e richiede la verifica delle emissioni di inquinanti, tra cui VOC e formaldeide. Comprende isolanti, materiali in legno, materiali compositi per cappotti, pitture, rivestimenti superficiali, adesivi, ecc.
EB label	EU Ecolabel (ISO 14024)	È un marchio di tipo I disciplinato dal Regolamento (CE) n. 66/10, applicato a tutti i beni distribuiti e/o consumati in Europa, ad eccezione dei medicinali. Definisce requisiti per diversi gruppi di prodotti quali rivestimenti per pareti e pavimenti, vernici, mobili, prodotti tessili e per pulizia.
EB label	Émissions dans l'air intérieur	Come sancito dal Decreto n. 321/2011, tutti i materiali edilizi per interni venduti e commercializzati in Francia devono riportare tale etichettatura, basata su una dichiarazione del produttore in base a delle prove in laboratorio. L'etichetta prevede la classificazione dei prodotti in 4 categorie a seconda delle emissioni di VOC a 28 giorni.
EB label	ANAB – ICEA (ISO 14024)	Nasce in Italia dalla collaborazione tra ANAB e ICEA con lo scopo di valorizzare i prodotti ecologici per costruzione e per arredo. Comprende prodotti e materiali per la bioedilizia, tra cui laterizi, isolanti, malte, intonaci, pitture, detergenti ecologici e bio-arredi.
EB label	EcoProdukte	Nata in Svizzera grazie al consorzio Ecobau come strumento per aiutare i progettisti e i committenti nel soddisfare i criteri dei protocolli Minergie-ECO e SNBS, questa valutazione prevede tre categorie di qualità dei materiali in funzione del consumo di energia grigia e dell'emissione di sostanze inquinanti. Comprende tutti i materiali da costruzione.
EB/CB label	Nordic Swan Ecolabel (ISO 14024)	Il Nordic Swan Ecolabel è stato istituito nel 1989 dal Nordic Council of Ministers come sistema volontario di etichettatura ecologica per i paesi nordici Danimarca, Finlandia, Islanda, Norvegia e Svezia. Definisce stringenti criteri ambientali legati al ciclo di vita, alle emissioni e all'utilizzo di sostanze chimiche per 59 categorie di prodotti.
EB label	GEV-EMICODE	Nato in Germania nel 1990, questo label prevede per diverse categorie di materiali, tra cui pavimenti, adesivi, vernici e materiali da costruzione, test di emissione secondo la ISO 16000-6. A valle di questi test, i materiali vengono suddivisi in tre classi in funzione dell'emissione di TVOC.

EB label	GUT	Si tratta di un'etichetta di prodotto introdotta in Germania nel 1990 per i pavimenti tessili. I prodotti devono rispettare limiti precisi di emissione per diverse sostanze a 3 e 28 giorni e non devono contenere sostanze pericolose per la salute. Include anche dei test sugli odori.
Sitografia: https://www.ul.com/news/ulc-standards-acquires-environmental-certification-and-advisory-firm-terrachoice https://greenseal.org/ https://living-future.org/declare/declare-about/ https://www.blauer-engel.de/en https://www.scsglobalservices.com/services/floorscore https://www.emicode.com/home/ https://carpet-rug.org/ https://spot.ul.com/greenguard/ https://indeklimamaerket.dk/about-danish-indoor-climate-labelling/ https://www.eco-institut.de/en/portfolio/m1/ https://www.natureplus.org/ http://ec.europa.eu/environment/ecolabel/index_en.htm https://www.eco-institut.de/en/portfolio/emissions-dans-lair-interieur/ http://www.anab.it/ https://www.eco-bau.ch/ https://www.eco-institut.de/en/portfolio/gut/		

Oltre a riferirsi alle suddette certificazioni volontarie di prodotto, nella selezione e nell'utilizzo dei materiali basso-emissivi si raccomanda il rispetto dei seguenti punti [13]:

- richiedere informazioni dettagliate circa la composizione dei materiali/prodotti e le corrispondenti proprietà emissive, così come le istruzioni da seguire per le fasi di stoccaggio, installazione, gestione e manutenzione;
- utilizzare prodotti a bassissima emissione di formaldeide;
- limitare l'uso di materiali porosi come moquette, tessuti e tappezzerie, anche per facilitare le procedure di pulizia;
- selezionare materiali a lunga durata, che necessitino di poca manutenzione e che permettano una facile pulizia. Si verifichi inoltre il rispetto della normativa antincendio vigente;
- evitare l'impiego di PVC contenenti ftalati per le pavimentazioni che, se a contatto con un substrato umido, può rilasciare emissioni secondarie come risultato del processo di idrolisi;
- limitare l'uso di rivestimenti sulle superfici interne dei condotti di ventilazione e rimuovere qualsiasi residuo di olio tramite prodotti di pulizia basso emissivi. Immediatamente a valle della posa, sigillare tutte le aperture del sistema VMC fino alla messa in funzione dello stesso per prevenire l'ingresso di contaminanti durante la fase di costruzione;

- prestare attenzione ai prodotti riciclati che, in alcuni casi, potrebbero essere inappropriati all'utilizzo indoor a causa delle emissioni degli adesivi aggiunti;
- evitare trattamenti chimici volti a bloccare la crescita microbica, responsabili di emissioni inquinanti e di alterazioni alle proprietà intrinseche dei materiali.

Tutti questi accorgimenti permettono di contenere entro certi limiti le concentrazioni raggiunte dagli inquinanti negli ambienti interni. Questi limiti dovrebbero essere tali da garantire una buona qualità dell'aria ma, al momento attuale, non esiste una norma specifica che ne definisca i valori massimi di target in funzione della categoria di IAQ che si intende conseguire. Ciò nonostante, alcune leggi in vigore permettono di guidare il progettista verso una scelta "responsabile" dei materiali utilizzati negli spazi interni. A livello nazionale, fermo restando il rispetto del Regolamento (UE) n. 305/2011 concernente l'obbligo di marcatura CE per tutti i prodotti da costruzione utilizzati durante la realizzazione o la ristrutturazione degli edifici scolastici [14], sono in vigore i Criteri Ambientali Minimi (CAM) per la stesura dei documenti progettuali e di appalto. I CAM, introdotti dal D.Lgs. 18 aprile 2016 n. 50 come parte integrante del "Piano d'azione per la sostenibilità ambientale dei consumi della pubblica amministrazione" (PAN GPP) [15], corrispondono a caratteristiche e prestazioni generalmente superiori a quelle previste dalle leggi nazionali e regionali vigenti, il cui rispetto deve comunque essere assicurato. Ciò costituisce un potenziale di miglioramento della qualità dell'aria nelle scuole, da implementare in conformità ai seguenti documenti:

- Criteri ambientali minimi per l'affidamento di servizi di progettazione e lavori per la nuova costruzione, ristrutturazione e manutenzione di edifici pubblici [8];
- Criteri ambientali minimi per l'affidamento del servizio di pulizia e sanificazione di edifici e ambienti ad uso civile, sanitario e per i prodotti detergenti [16];
- Criteri ambientali minimi per gli arredi per interni, per l'edilizia e per i prodotti tessili [17].

I primi, nello specifico, contengono requisiti sui limiti di emissione a 28 giorni di diverse sostanze inquinanti e un elenco dei materiali interessati da tali prescrizioni.

Nel prosieguo verranno analizzate alcune categorie di materiali che, avendo un impatto rilevante sull'IAQ, richiedono un'analisi più dettagliata. L'attenzione si focalizzerà inizialmente sui prodotti utilizzati entro lo strato di tenuta all'aria e che, una volta posati, si trovano direttamente a contatto con l'ambiente interno, come pitture, vernici e pavimenti; inoltre, le elevate superfici di emissione che caratterizzano questi materiali giustificano appieno tale scelta. Anche i sigillanti e adesivi meritano un approfondimento a parte, in quanto possono avere un potenziale di inquinamento più o meno importante in funzione dell'area di posa e degli elementi con cui interagiscono. Infine, verranno passate in rassegna le categorie meno "critiche", ovvero tutti quei prodotti che possono essere stoccati in luoghi asciutti e ben ventilati prima della posa, come arredamenti e apparecchiature scolastiche, prodotti in legno incollato e materiali porosi. Ciò nonostante, si vuole rimarcare come tali categorie possano dar luogo ad un incremento considerevole del rilascio di inquinanti se sottoposte a lavorazioni successive o a condizioni termo-igrometriche anomale; pertanto necessitano anch'esse di un'accurata analisi.

2.1.2) Prodotti liquidi per interni

La categoria merceologica dei prodotti liquidi per interni comprende una vasta gamma di materiali, tra cui spiccano per importanza le pitture e le vernici. Esse rappresentano una delle fonti di inquinamento indoor più significative: infatti, una volta entrate in contatto con l'ambiente interno, possono provocare delle reazioni secondarie che ne intensificano il comportamento emissivo. Ciò giustifica la grande attenzione da dedicare alle fasi di test in laboratorio, che dovrebbero rispecchiare le reali condizioni in cui un dato materiale si troverà a lavorare, al fine di determinarne le effettive emissioni inquinanti.

Nonostante siano disponibili sul mercato numerose vernici con dicitura "low-VOC" e "zero-VOC", nella scelta del materiale devono essere considerate anche le prestazioni dello stesso in termini di tossicità, resistenza nel tempo e infiammabilità. Alcune superfici, infatti, necessitano di essere trattate con appositi rivestimenti, noti come ritardanti di fiamma. Con tale appellativo si identificano le sostanze in grado di prevenire, ritardare o inibire la diffusione del fuoco, da utilizzarsi su molteplici strutture come elementi opachi, pavimenti, arredamento e attrezzature da ufficio. Tra i ritardanti di fiamma, destano particolare preoccupazione gli eteri difenili polibromurati, appartenenti alla famiglia dei ritardanti di fiamma bromurati e sospettati di essere cancerogeni, oltre che dannosi per il sistema nervoso. Analogamente, sono sotto stretta osservazione i prodotti in poliuretano trattati con organofosfati, ai quali vengono imputate emissioni di VOC e degradazione di clorurati. Sono invece da preferire i trattamenti in poliammide per gli arredi e con acido borico per gli elementi isolanti in cellulosa, così come i ritardanti di fiamma cementizi [13].

Di seguito, alcune raccomandazioni da tenere a mente nell'applicazione delle vernici:

- utilizzare prodotti a basse emissioni di VOC e se possibile, ad asciugatura rapida. A tale proposito, è possibile consultare le etichette specificatamente dedicate alle vernici e ai rivestimenti come il Natureplus e l'ANAB-ICEA;
- utilizzare per le superfici minerali (per pareti e soffitti) pitture ad emulsione e latex, ove possibile;
- preferire le vernici acriliche a base acquosa alle vernici a base di solvente, anche per il trattamento dei parquet. Le prime, infatti, contengono meno VOC rispetto alle seconde, sono inodore e asciugano molto rapidamente. Ciò nonostante, recenti studi hanno evidenziato come talune vernici a base acquosa diano luogo a reazioni secondarie che impattano notevolmente sull'IAQ: pertanto si consiglia ove possibile di limitarne comunque l'utilizzo;
- evitare pitture e vernici per interni che contengono plastificanti, preferendo sostanze che non diano luogo al cosiddetto effetto fogging;
- richiedere i dati di emissione relativi alla composizione finale della vernice, includendo eventuali coloranti in essa aggiunti;
- coprire eventuali mobili rivestiti in tessuto che potrebbero assorbire VOC, ad esempio con teli di plastica. Specificare la sequenza di installazione in modo che le applicazioni "bagnate", tra cui appunto le verniciature, si verifichino prima dell'installazione di materiali "soffici" e lanosi;

- applicare le vernici durante i periodi di chiusura della scuola, mantenendo un'adeguata ventilazione sia durante che dopo la tinteggiatura;
- effettuare il “flush out” dell'edificio prima che questo venga occupato. Nei periodi successivi, garantire ricambi d'aria maggiori rispetto a quelli normalmente registrati;
- evitare vernici spray e mantenere i contenitori chiusi più a lungo possibile sia durante che dopo l'utilizzo.

Si sottolinea inoltre l'importanza del fattore durabilità: un materiale che resiste a lungo senza subire deterioramenti emette di meno, in quanto richiede poca manutenzione e minori riverniciature, senza considerare i benefici derivanti da un utilizzo più sporadico di cere e prodotti di pulizia.

2.1.3) Pavimenti

La scelta del materiale di copertura del pavimento dipende da molteplici aspetti, tra cui l'estetica, il comfort termico, l'acustica e l'illuminazione. Ciò nonostante, anche la qualità dell'aria risente fortemente di tale scelta, a causa dell'elevata superficie di emissione: l'obiettivo sarà allora quello di trovare un giusto compromesso tra tutti i sopracitati aspetti, a salvaguardia dell'IEQ.

Nella trattazione che segue verranno prese in considerazione solo le caratteristiche di emissione dei vari materiali, senza considerare gli ulteriori parametri prestazionali che si assume siano rispettati. Inoltre, verrà data grande importanza alla frequenza con cui un dato materiale necessita di essere pulito e mantenuto.

I pavimenti maggiormente utilizzati nelle scuole corrispondono ai cosiddetti pavimenti resilienti: sono costituiti soprattutto da gomma, sughero, linoleum, pvc e composti vinilici. Tuttavia, negli ultimi anni è stata osservata una crescente diffusione del legno e della ceramica.

Si sottolinea come, indipendentemente dalla natura del pavimento, nella valutazione del potenziale di emissione, così come nella fase di test in laboratorio, debba essere contemplato anche l'impatto di qualsiasi colla o adesivo ivi utilizzato.

Per quanto riguarda i pavimenti resilienti, si raccomanda di:

- scegliere prodotti che siano stati testati circa le emissioni di VOC, consultando etichette di qualità ecologica come Green Label, GEV-EMICODE e FloorScore;
- installare il prodotto con adesivi e colle a basse emissioni di VOC, al fine da minimizzare il carico inquinante da smaltire;
- selezionare materiali che richiedano poca pulizia e manutenzione, da effettuarsi con prodotti a basse emissioni di VOC secondo le indicazioni del costruttore;
- fornire una ventilazione addizionale per un minimo di 72 ore successive all'installazione.

Si presti inoltre attenzione agli oli contenuti nel linoleum che, reagendo con l'ozono dell'aria, possono dar luogo a formaldeide come prodotto di reazioni secondarie.

Meritano invece un discorso a parte i pavimenti in PVC. Per conferire loro flessibilità ed elasticità, vengono aggiunti in miscela dei plastificanti, tra cui i ftalati. Questi possono essere distinti in due grandi famiglie: ftalati a basso peso molecolare e ftalati ad alto peso molecolare. I primi, comprendenti Di(2-etilexil)ftalato (DEHP), Butilbenzilftalato (BBP), Dibutilftalato (DBP) e Diisobutilftalato (DiBP) sono classificati come agenti tossici del gruppo B1 e il loro utilizzo e commercializzazione in Europa è stato bandito ai sensi del Regolamento REACH [18]; i secondi invece, come il Diisonilftalato (DiNP), il Diisodecilftalato (DiDP) e il Bis(2-propileptil)ftalato (DPHP), non hanno impatti considerevoli sull'IAQ e possono quindi essere impiegati nelle miscele dei pavimenti in PVC. Ciò nonostante, recenti studi hanno dimostrato la presenza di un rischio di tossicità epatica soprattutto nei bambini piccoli: per questo motivo, l'utilizzo di ftalati ad alto peso molecolare (DiNP e DiDP) nei giocattoli e negli articoli destinati all'infanzia non è consentito in concentrazioni superiori allo 0,1%. Analogamente, il DPHP, utilizzato da diverso tempo come plastificante, è al momento oggetto di verifica da parte delle autorità dell'UE, in quanto potenzialmente nociva per la tiroide e l'ipofisi. Di conseguenza, la prima raccomandazione è sempre quella di verificare che il prodotto in oggetto rispetti il Regolamento REACH e che quindi non contenga ftalati a basso peso molecolare; in secondo luogo, sarebbe opportuno acquistare solamente prodotti certificati secondo una delle etichette di qualità analizzate, dando precedenza ai materiali privi di acido ftalico come struttura di base e costituiti invece da acidi organici [19]. Quanto detto vale, anche se in misura più contenuta, per i pavimenti vinilici e per quelli in linoleum.

La moquette, invece, può essere vista come un sistema formato da più componenti: il tessuto principale (in lana, nylon, polipropilene o poliestere) è adagiato su due strati di materiale di supporto (tipicamente in iuta o cotone), che aderiscono al solaio mediante appositi adesivi o tramite un sottofondo di poliuretano, fibre sintetiche o gomma. In aggiunta, la superficie del tessuto può essere trattata con coloranti, agenti antipolvere, protezioni antimacchia e ritardanti di fiamma. Tra i VOC, le emissioni più pericolose sono rappresentate dal 4-phenylcyclohexene (4-PC) il quale, reagendo con l'ozono contenuto nell'aria, dà origine a formaldeide e aldeidi ad alto peso molecolare; ancora, è bene verificare che il rilascio di stirene sia più basso possibile. Di conseguenza, per limitare l'impatto di questi sistemi sull'IAQ, il *Carpet and Rug Institute* (CRI) ha fissato dei valori soglia circa le emissioni di TVOC, formaldeide, stirene e 4-PC dalle moquette [20], mentre la *Association of Environmentally Friendly Carpets* (GUT) ha stabilito delle procedure standard per misurarne le emissioni in camera di prova [21]. Tutti questi requisiti vengono soddisfatti dalle etichette Green Label e Green Label Plus, specificatamente dedicate alla certificazione di pavimentazioni in tessuto a basse emissioni di inquinanti [22].

In sintesi, nella selezione e nell'impiego delle moquette si raccomanda di:

- fare riferimento all'etichetta Green Label Plus, GUT, The Blue Angel per identificare prodotti a basse emissioni;
- scegliere tessuti che richiedano poca manutenzione e che possano essere puliti facilmente. A tale proposito è richiesta un'aspirazione regolare da effettuarsi con un'apposita macchina dotata di un sacchetto di filtrazione ad alte prestazioni, affinché tutta lo sporco, la polvere, i pollini e le particelle varie possano essere aspirate e trattenute. A testimonianza dell'importanza di questa

operazione, il CRI ha istituito un'etichetta (*Green Label Vacuum Cleaner Indoor Air Quality Testing Program*) con l'obiettivo di identificare le macchine più efficienti [23];

- a monte dell'installazione, stoccare il tessuto in un luogo pulito, asciutto e ben areato;
- assicurarsi che il calcestruzzo sia sufficientemente indurito e asciutto prima che la moquette venga installata su di esso, al fine di evitare la formazione di muffe e funghi;
- effettuare la posa della moquette il più tardi possibile, per evitare che i VOC rilasciati dalle vernici delle pareti possano essere assorbiti dalle fibre del tessuto e riemessi successivamente. In generale, si consiglia di coprire tutte le superfici tessili con dei teli e di incrementare la ventilazione fino a completa asciugatura delle vernici;
- utilizzare l'adesivo meno tossico disponibile e nella minore quantità possibile, a patto che sia compatibile con la moquette selezionata;
- fornire una ventilazione addizionale nelle 72 ore successive all'installazione del prodotto.
- nelle ristrutturazioni, l'installazione della moquette dovrebbe avvenire nella stagione estiva o quando l'edificio scolastico non è in uso per lunghi periodi di tempo.

Per rendere più efficace l'operazione di pulizia, si suggerisce l'impiego di tappetini d'ingresso che dovrebbero essere considerati già in fase di progettazione dell'edificio piuttosto che come un semplice elemento di arredo. Infatti, essi permettono di intrappolare le polveri e di trattenere l'umidità che, altrimenti, si spargerebbero su tutto il pavimento. In Figura 2.2 viene proposto un esempio di come andrebbero organizzati tali tappetini.

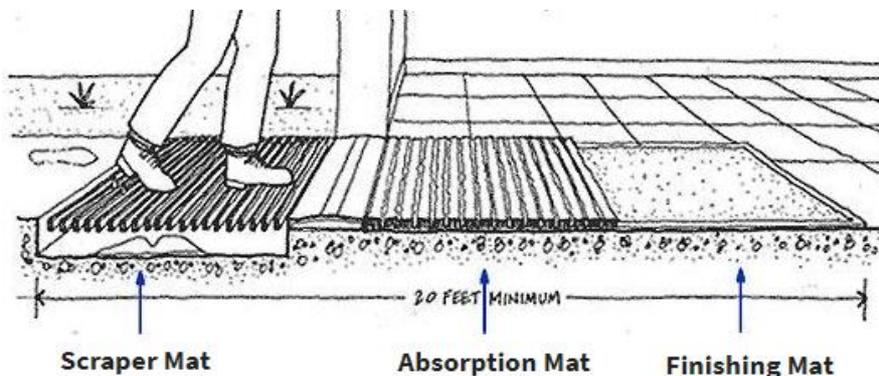


Figura 2.2. Esempio di tappetini da posizionare all'ingresso di un edificio scolastico [24]

2.1.4) Prodotti a base di legno incollato

I prodotti a base di legno incollato comprendono una vasta gamma di materiali, tra cui spiccano per importanza i pannelli in compensato, i pannelli di fibre a media densità (MDF), i pannelli a scaglie orientate (OSB), i pannelli multistrato e in legno duro. Vengono spesso utilizzati in combinazione alle fibre agricole per la produzione di arredamenti, mobili vari e porte. Le emissioni imputabili a questi prodotti dipendono dalle materie prime, dal trattamento superficiale e soprattutto dalle colle impiegate nella lavorazione e

devono sottostare ai limiti previsti dalla legislazione vigente. Questa, nel corso degli anni, ha imposto delle condizioni sempre più restrittive circa le emissioni di formaldeide da pannelli a base di legno incollato, escludendo, di fatto, la colla urea-formaldeide (UF) da tali prodotti. Ciò nonostante, dato che il loro impatto è funzione di molti altri inquinanti, si rimanda ai sigilli di qualità disponibili sul mercato, come EU Ecolabel e The Blue Angel, per l'acquisto di elementi a base di legno basso emissivi.

Di seguito, alcune raccomandazioni generali:

- utilizzare materiali privi di resine ureico-formaldeide, così come di resine melamminiche e fenoliche, preferendo colle vegetali prive di emissioni;
- evitare di effettuare tagli o lavorazioni sul prodotto finito. Se necessario, applicare barriere e/o trattamenti per limitare le emissioni in corrispondenza degli angoli e delle superfici esposte;
- impiegare prodotti che siano stati etichettati sulla base delle emissioni dei singoli VOC e non solo in funzione della formaldeide;
- assicurare un'adeguata ventilazione durante l'installazione e nel periodo successivo, fino a completa estinzione dell'odore caratteristico di questi materiali;
- proteggere il pannello da alte temperature e da elevati valori di umidità.

Rispetto alle colle UF, i prodotti con adesivi a base di melammina-formaldeide (MF) e di melammina-urea-formaldeide (MUF) sono meno soggetti al rilascio di formaldeide, grazie alla maggiore reattività e alla resistenza all'idrolisi dei legami formati dalla melammina, ma sono comunque sottoposti a tutte le considerazioni elencate in precedenza.

Si ricorda come tutti i materiali a base di legno incollato, affinché possano essere immessi sul mercato europeo e commercializzati, debbano soddisfare la classe di emissione E1 secondo la norma UNI EN 13986 [25] in conformità al D.M. 10/10/2008; allo stesso tempo, questi prodotti, se utilizzati negli edifici pubblici, come le scuole, devono verificare i criteri contenuti nei CAM edilizia, che, nello specifico, impongono un limite massimo di emissione di formaldeide pari a $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Tale valore, cogente a livello nazionale, è quindi ben più stringente di quello richiesto per la classificazione E1.

2.1.5) Sigillanti e adesivi

A questi prodotti vengono imputate elevate emissioni inquinanti, in quanto ampiamente utilizzati negli spazi indoor. I sigillanti comprendono schiume, stucchi e mastici, mentre gli adesivi sono utilizzati in molteplici applicazioni, tra cui pavimentazioni, moquette, rivestimenti in legno e cartongesso, saldature, guarnizioni e piastrelle. Essendo applicati allo stato bagnato, il loro impatto è particolarmente elevato nelle prime 72 ore successive alla posa, durante le quali è richiesta una ventilazione molto sostenuta.

Inoltre, i metodi di test dovrebbero rispecchiare le effettive condizioni di esercizio degli adesivi, misurando le emissioni complessive di inquinanti associate al pacchetto costruttivo completo.

Di seguito, alcune raccomandazioni generali:

- tra i prodotti adatti ad una determinata applicazione, identificare e utilizzare quelli meno emissivi, sfruttando le informazioni riportate sulle etichette ambientali, come Natureplus, EU Ecolabel e GEV Emicode;
- minimizzare la quantità di adesivo impiegata in fase di installazione, rispettando comunque i requisiti di performance imposti dal produttore;
- utilizzare, ove possibile, sistemi di sigillatura meccanica;
- aumentare i tassi di ventilazione nelle aree interessate sia durante che dopo l'applicazione degli adesivi e sigillanti, realizzando, se possibile, un *flush-out* dell'edificio.

2.1.6) Materiali porosi

I materiali porosi possono essere distinti in due famiglie principali: da una parte le superfici in cartongesso e i pannelli per controsoffitti in perlite e cellulosa e dall'altra i prodotti tessili, tra cui tappeti, moquette, pannelli acustici in fibra di vetro e isolamenti in lana di roccia/vetro. Nonostante questi materiali possano emettere VOC e formaldeide, un ulteriore problema associato al loro impiego consiste nel cosiddetto "*sink effect*", che consiste in un fenomeno di assorbimento di inquinanti prodotti da altre fonti presenti nell'edificio. Questi possono poi essere rilasciati nel tempo, ad un tasso di emissione che sarà funzione della temperatura e dell'umidità interna. Tenendo conto di tale fenomeno, si consiglia di:

- limitare l'utilizzo di materiali porosi, o perlomeno, ritardarne l'installazione fino a quando l'emissione da parte di vernici e solventi non si sia esaurita o comunque stabilizzata;
- impiegare prodotti certificati che abbiano basse emissioni di VOC e formaldeide.

I pannelli in controsoffitto vengono spesso utilizzati nelle scuole e richiedono quindi molta attenzione, sia nella fase di progettazione che di posa. Infatti, oltre ad assicurarsi che siano basso-emissivi e performanti dal punto di vista dell'isolamento acustico, vi è la necessità di salvaguardare l'accessibilità ai sistemi HVAC per le operazioni di gestione e manutenzione, come la sostituzione dei filtri e di altri componenti. Si consiglia, inoltre, di verificare periodicamente lo stato dei pannelli, alcuni dei quali potrebbero assorbire eccessiva umidità e mostrare segni di muffa.

2.1.7) Materiali isolanti

Gli isolanti più comuni utilizzati negli ambienti indoor possono essere suddivisi in tre gruppi principali, caratterizzati rispettivamente da elementi fibrosi, da cellulosa e da polimeri derivanti da lavorazioni petrolchimiche. Riguardo ai primi, che necessitano di adesivi per legare tra di loro le fibre, si consiglia l'impiego di prodotti che non emettano formaldeide, ma che allo stesso tempo offrano ottime proprietà in termini di protezione contro il fuoco, tossicità e stabilità chimica.

Un discorso analogo può essere fatto per i ritardanti di fiamma alogenati, con cui alcuni prodotti isolanti vengono trattati per raggiungere gli standard di protezione contro il fuoco, assieme alle considerazioni presentate nei paragrafi precedenti.

2.1.8) Arredamento e apparecchiature scolastiche

L'arredamento scolastico, caratterizzato da banchi, sedie e lavagne, offre una superficie di emissione molto elevata e come tale deve essere accuratamente selezionato, consultando i sigilli di qualità ecologica come The Blue Angel, EU Ecolabel e Indoor Climate Label. Il pericolo maggiore è legato alla presenza di elementi in legno incollato, di vernici e di superfici porose, per i quali si rimanda ai paragrafi precedenti, che possono agire sia come fonte che come assorbitore di inquinanti. Per quanto concerne le lavagne, si raccomanda una pulizia da effettuarsi al termine di ogni giornata con panni umidi, preferendo detergenti ecologici.

Parimenti agli arredamenti, i dispositivi elettronici come computers e stampanti sono fonte di inquinamento, con tassi di emissione fortemente variabili a seconda della durata e della frequenza dei cicli di accensione e spegnimento. Anche l'età dei dispositivi stessi influenza pesantemente l'IAQ: le nuove fotocopiatrici che lavorano a secco sono meno impattanti rispetto a quelle impiegate in passato, che utilizzavano solventi liquidi nel processo di stampaggio. Ancora, le stampanti laser emettono VOC, ozono e particolato in quantità maggiori rispetto alle macchine a getto d'inchiostro, che sarebbero dunque da preferire in termini di emissioni di inquinanti. Per una scelta ragionata delle apparecchiature elettroniche si rimanda al marchio The Blue Angel.

Pertanto, si consiglia di mantenere dei tassi di ventilazione maggiori nelle aule di informatica per compensare le emissioni derivanti dai computers, e analogamente, negli ambienti contenenti stampanti e fotocopiatrici.

Vengono di seguito riportati ulteriori suggerimenti relativi alla scelta e all'utilizzo delle macchine:

- selezionare stampanti laser a basso consumo di energia, in quanto i tassi di emissione sono proporzionali alla potenza impegnata;
- sostituire, se possibile, vecchi dispositivi con altri di più recente costruzione, che non contengano ftalati. Inoltre, si consiglia di far lavorare le nuove apparecchiature durante i periodi di inoccupazione;
- gli ambienti contenenti stampanti e fotocopiatrici devono essere equipaggiati con un apposito circuito di estrazione dell'aria;
- seguire le istruzioni del produttore circa la corretta manutenzione di tutte le apparecchiature al fine di ridurre l'impatto sull'IAQ.

Nonostante tutte queste raccomandazioni, è possibile che alcuni prodotti ad alte emissioni vengano ancora impiegati negli spazi interni. Infatti, nella scelta di un materiale vi sono ulteriori aspetti da considerare oltre all'impatto sull'IAQ, tra cui la resistenza, la durabilità e l'inflammabilità. Di conseguenza, si renderanno necessarie ulteriori tecniche per limitarne gli effetti sulla salubrità dell'aria interna.

2.2) Strategie per limitare l'impatto delle emissioni

Alcuni materiali, in virtù delle loro proprietà, vengono utilizzati negli ambienti scolastici nonostante presentino importanti emissioni di inquinanti: è il caso di taluni rivestimenti come le vernici, le quali, in

funzione del tipo di applicazione, devono garantire una determinata classe di resistenza al fuoco. Per limitarne l'impatto sulla qualità dell'aria interna, possono essere implementate delle strategie che prevedono l'impiego di sistemi e procedure di contenimento, tra cui barriere, filtri ad alta efficienza, programmazione dell'occupazione, *flush-out* e tecniche di ventilazione.

2.2.1) Barriere per composti organici volatili

Queste strategie di contenimento vengono applicate in corrispondenza di angoli esposti o superfici tagliate di materiali come il legno incollato, caratterizzate da emissioni specifiche maggiori rispetto a quelle "nominali". Le pareti in cartongesso non verniciato, invece, possono essere sottoposte a trattamenti superficiali volti a inibire il rilascio di inquinanti dagli strati sottostanti, impedendone il riassorbimento e la successiva re-emissione.

Le vernici a polvere epossidica rappresentano gli strumenti più efficaci per contenere le emissioni di formaldeide e di TVOC da pannelli di fibre a media densità (MDF), con un rendimento superiore al 90%. I pannelli di particelle possono essere rivestiti con carte fenoliche, viniliche o melaminiche, le quali garantiscono buone efficienze circa il contenimento della formaldeide, mentre risultano meno performanti nei confronti degli altri VOC [26]. A tale proposito in Tabella 2.4 vengono passate in rassegna le principali barriere attualmente impiegate per inibire il rilascio di composti organici volatili:

Tabella 2.4. Barriere ed efficienze di inibizione delle emissioni di formaldeide da pannelli di particelle, MDF e rigidi [13].

Tipo di barriera	Esempi	Efficienza rispetto alla formaldeide
Laminati spessi	Laminati ad alta pressione Fogli fenolici impregnati Fogli vinilici	80%-95% 80%-95% 80%-95%
Laminati sottili	Laminati melaminici a bassa pressione Laminati in poliestere a bassa pressione Fogli vinilici sottili	80%-95% 80%-95% 80%-95%
Rivestimenti applicati allo stato liquido	Acrilato Sigillante alcolico Alchidico e lattice Primer sigillante alchidico Poliuretano Poliuretano a base acquosa Acetato di polivinile	80%-95% 80%-95% 80%-95% 70%-90% 70%-90% 80%-95% 80%-95%
Rivestimenti in polvere	Polvere epossidica	80%-95%
Impiallaccature	Impiallaccature in legno	bassa o moderata

Chiaramente, è richiesta attenzione anche nella scelta delle barriere stesse, che non devono emettere inquinanti e non devono rallentare troppo l'emissione dello strato sottostante, pena una maggiore

esposizione a lungo termine per gli occupanti a VOC e formaldeide. Infatti, si consiglia di non applicare barriere su materiali caratterizzati da un rilascio molto rapido e limitato nel tempo, preferendo puntare su una maggiore ventilazione a valle dell'installazione degli stessi.

2.2.2) Stoccaggio e tecniche di ventilazione

Alcuni materiali, come rotoli di moquette, piastrelle e arredamenti costituiti da pannelli di fibre o di particelle, vengono avvolti con teli di plastica al fine di mantenerne la pulizia e l'integrità e come tali arrivano in cantiere. Per evitare che in fase di installazione vengano rilasciate elevate quantità di inquinanti, i prodotti, una volta liberati dalle rispettive pellicole di protezione, dovranno essere stoccati in spazi ben areati e con bassa umidità. Durante la posa e in corrispondenza di qualsiasi attività di costruzione si consiglia di utilizzare un ventilatore di estrazione che fornisca circa 5 volumi ora e che faccia defluire verso l'esterno tutte le polveri e gli inquinanti generati dalle lavorazioni. Questo concetto deve essere implementato anche negli ambienti soggetti ad elevate emissioni, come ripostigli e stanze contenenti fotocopiatrici e stampanti, che, mediante opportune bocchette di estrazione, andrebbero mantenuti sempre in depressione.

A seguito della posa dei materiali e prima dell'occupazione, si raccomanda di far lavorare l'impianto di ventilazione ad una portata maggiore rispetto alle condizioni nominali di funzionamento, realizzando il cosiddetto *flush-out* dell'edificio. In questo modo non solo vengono smaltite le elevate concentrazioni di inquinanti tipiche del periodo successivo al completamento dei lavori, ma viene ridotto anche il problema dei cattivi odori emanati dalle finiture superficiali, di cui gli occupanti si lamentano una volta entrati nell'edificio.

Le procedure di *flush-out* si eseguono in modalità diverse a seconda del clima locale e della tipologia di edificio. Per le scuole di nuova costruzione, l'EPA consiglia un ricambio d'aria minimo pari a 1 volume ora, da garantire per un periodo di tempo compreso tra 7 e 90 giorni successivi al termine dei lavori per 24 ore al giorno [27]. Nel caso di risanamenti che coinvolgano le finiture superficiali, il *California Interagency Working Group on Indoor Air Quality* suggerisce di condurre il *flush-out* per almeno 1-2 settimane antecedenti all'occupazione e di esercire l'impianto HVAC al massimo tasso di ventilazione per alcuni giorni successivi alla stessa [28]. Inoltre, è bene il rispetto dei seguenti criteri:

- le operazioni di pulizia al termine dei lavori devono essere effettuate prima del *flush-out* e senza l'impiego di forti solventi;
- il funzionamento dell'impianto di ventilazione, e quindi anche il *flush-out*, dovrebbe tenere conto delle condizioni esterne, evitando ad esempio che i picchi di immissione dell'aria esterna coincidano con le ore di punta del traffico;
- assicurare un'adeguata deumidificazione dell'aria esterna nei climi molto umidi;
- utilizzare filtri che garantiscano elevate prestazioni alla portata massima di ventilazione dell'impianto, anche durante il *flush-out*.

Si sottolinea come i costi e le tempistiche di cui il processo di *flush-out* necessita, possono essere notevolmente ridotti attraverso una selezione e una posa accurata di materiali basso emissivi.

Nel caso di ristrutturazioni parziali, per impedire che i contaminanti e le polveri prodotte possano migrare all'interno delle zone occupate, è possibile installare delle pareti provvisorie e/o dei teli di plastica; in alternativa, si può mantenere in depressione l'ambiente interessato dai lavori mediante dei ventilatori, o viceversa, creare una sovrappressione all'interno delle aree occupate sfruttando l'impianto di areazione eventualmente presente.

2.2.3) Condizioni ambientali interne

È ben noto come il fenomeno di emissione da parte dei materiali sia influenzato dalle condizioni termogrometriche interne, come temperatura e umidità relativa. Questi parametri sono soggetti a variazioni più o meno importanti nell'arco dell'anno e quindi gli effetti sul rilascio di inquinanti possono essere anche notevoli. Analogamente, bisogna prestare attenzione alle superfici sottoposte ad elevati carichi solari e a quelle in contatto con pavimenti radianti, che potrebbero surriscaldarsi emettendo inquinanti in quantità maggiore.

In particolare, per quantificare l'incremento del tasso di emissione di formaldeide all'aumentare di temperatura e umidità, è possibile fare riferimento alla norma UNI EN ISO 16000-2 o utilizzare il tool di progettazione dell'IAQ sviluppato nell'ambito del progetto QAES, in cui sono state ricavate delle funzioni analitiche partendo da dati sperimentali.

2.3) Pulizia e prodotti per l'igiene

Una pulizia regolare degli ambienti interni attuata mediante tappetini d'ingresso, panni umidi monouso, aspirapolveri ad alta efficienza e macchine per pavimenti a media velocità permette di ridurre la concentrazione di polveri, VOC e batteri presenti nell'aria interna. Analogamente, la scelta di prodotti che garantiscono un'elevata igiene e che non impattano negativamente sull'IAQ risulta essere di fondamentale importanza: non è raro, infatti, che gli occupanti lamentino irritazioni a naso, gola e occhi dopo le operazioni di pulizia. Di conseguenza, si raccomanda di minimizzare l'impiego di tali prodotti attraverso la progettazione di sistemi efficienti, come tappetini e filtri, che impediscano l'ingresso di inquinanti dall'esterno e la selezione di superfici che richiedano poca manutenzione. Si consiglia dunque il rispetto dei seguenti criteri:

- utilizzo di materiali a bassa porosità, che non intrappolino polvere e sporco e che abbiano, se possibile, una buona resistenza microbica;
- installazione di pavimenti che non necessitino di pulizia ad umido. L'umidità, infatti, comporta un incremento del rilascio di inquinanti e può rappresentare un terreno di coltura per muffe e funghi;
- adozione di sistemi che blocchino l'ingresso di polveri e particelle tramite calpestio, soprattutto in presenza di moquette. Quest'ultima presenta numerosi svantaggi, associati alla difficoltà di eseguire una pulizia efficiente e ai problemi derivanti da un'eccessiva umidificazione dei tessuti;
- per i servizi igienici, si consigliano piastrelle di grandi dimensioni, in modo tale da limitare la presenza di fughe, che sono difficili da pulire. È importante che i materiali ivi impiegati siano facili da pulire senza dover utilizzare detergenti specifici che possono essere più impattanti.

Come regola generale, sono da evitare le sostanze spray e gli agenti a base di terpeni, i quali possono reagire con l'ozono contenuto nell'aria, dando luogo a composti secondari molto irritanti. Inoltre, si incentivi all'uso di acqua calda, con cui è possibile ridurre la concentrazione richiesta di sostanze detergenti rispetto a quanto accadrebbe con l'acqua fredda.

Tipologie, procedure e frequenza delle attività di pulizia andrebbero tarate specificatamente per le esigenze degli edifici scolastici e i materiali andrebbero puliti con l'obiettivo di minimizzare l'esposizione degli studenti a contaminanti chimici/microbiologici e alla diffusione dei virus. In particolare, è importante che le operazioni di igiene avvengano con le seguenti frequenze [29]:

- almeno una volta al giorno, con opportuni disinfettanti, per le aree sanitarie e per i servizi igienici;
- almeno una volta al giorno per l'area di ingresso;
- a giorni alterni o almeno tre volte alla settimana per corridoi e scale;
- almeno una volta al giorno per palestre o aree adibite ad attività fisica;
- almeno una volta al giorno per le aule scolastiche e per i relativi banchi, con panni umidi per ridurre la concentrazione di particolato.

2.3.1) Prodotti per l'igiene a basse emissioni

Sono disponibili sul mercato diversi prodotti di pulizia, che possono essere distinti in funzione del tipo di applicazione e degli agenti chimici contenuti al loro interno. Questi includono acidi caustici, alcali, sostanze antimicrobiche, solventi di natura organica, alcoli e aldeidi. Di conseguenza, si comprende come i prodotti per l'igiene, soprattutto disinfettanti, detergenti e sterilizzanti, possano ripercuotersi negativamente sull'IAQ e siano pericolosi per la salute delle persone, come descritto in Tabella 2.5:

Tabella 2.5. Contaminanti presenti nei prodotti di pulizia e relativo impatto sulla salute delle persone [30]

Contaminante	Prodotto	Impatto potenziale sulla salute
Alcoli (etanolo, isopropanolo)	disinfettanti	se combinati assieme a composti fenolici o ad ammoniaca, possono causare irritazioni
Aldeidi (glutaraldeide, formaldeide)	disinfettanti e sterilizzanti	irritazioni, mal di testa, nausea, allergie alla pelle e cancro (a causa della formaldeide)
Ossidanti (cloro)	disinfettanti	tossici se ingeriti
Eteri glicolici	solventi	tossici per la riproduzione
Fenoli	detergenti	irritazioni a occhi e pelle, cancerogeni se contenenti orto-fenilfenolo
Ftalati	lucidanti, fragranze	anomalie riproduttive, asma, cancro al fegato
Composti di ammonio quaternario	disinfettanti	asma, allergie e irritazioni alla pelle. Probabilmente tossici per intestino e fegato
Terpeni	detergenti all'olio di pino	reagendo con l'ozono danno luogo a formaldeide, radicali idrossilici e aerosol

Alcune sostanze, inoltre, danno luogo a prodotti inquinanti secondari reagendo con l'ozono contenuto nell'aria: è il caso degli oli detergenti profumati contenenti terpenoidi, tra cui α -terpinene, d-limonene e terpinolene, responsabili della formazione di formaldeide, particolato fine e aerosol organici; analoghe problematiche si riscontrano con fluidi a base di eteri di glicole.

Per conoscere l'effettivo impatto di un prodotto sulla qualità dell'aria interna è possibile consultare le banche dati appartenenti ai marchi di qualità ecologica, come EU Ecolabel, The Blue Angel e Green Seal, oppure le linee guide per l'acquisto elaborate da enti come EPA [30], ASTM [31] e AIAB [32].

2.3.2) Stoccaggio dei prodotti per l'igiene

I ripostigli in cui vengono conservati i prodotti per l'igiene devono essere provvisti di bocchette di estrazione senza ricircolo interno, in modo che l'aria venga solamente espulsa; i pavimenti devono essere realizzati in pendenza, con piastrelle a composizione vinilica o in cemento con un rivestimento resistente agli agenti chimici. Come regola generale, si consiglia di prevedere un ripostiglio ogni 1300-1700 m² di superficie netta.

È inoltre richiesto di specificare con apposite istruzioni la corretta preparazione delle soluzioni liquide per l'igiene e le relative schede tecniche con annesse avvertenze su eventuali pericoli associati al loro utilizzo; queste andranno sistemate e accuratamente protette all'interno dei ripostigli stessi.

Infine, è necessario che gli addetti alla pulizia seguano opportuni corsi di formazione per la produzione di composti bilanciati dal punto di vista delle concentrazioni, così da evitare un surplus di emissioni dovuto a prodotti troppo "forti" o, viceversa, un'igiene insufficiente.

Tutte le informazioni riguardanti l'approvvigionamento e la preparazione dei prodotti per l'igiene, la formazione degli addetti, l'organizzazione delle attività di pulizia e la gestione di un'adeguata ventilazione prima e dopo le stesse, devono essere previste e inserite all'interno del piano di O&M dell'edificio scolastico, sotto l'appellativo di "Protocollo di Pulizia".

2.4) Bibliografia

- [1] <https://www.qaes.it/work-packages/indagine-sullo-stato-dellarte-e-del-mercato>
- [2] ANSI/ASHRAE Standard 62.1-2007, *Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality*. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2007.
- [3] L. Mølhave, *Organic compounds as indicators of air pollution*, Indoor Air 13 (Suppl. 6): 12-19.
- [4] P. Wolkoff, *How to measure and evaluate VOC emissions from building materials*. A perspective. The science of the Total Environment 227: 197-213.
- [5] C. Yu, D. Crump, *VOC emissions from building products*, BRE Digest, 2002.
- [6] National Research Council Canada Institute for Research in Construction, *Indoor Air Quality Emission Simulation Tool (IA-QUEST)*, Ottawa, 2008.
- [7] Il parlamento europeo e il consiglio dell'unione europea (2004), *Direttiva 2004/42/CE del Parlamento europeo e del Consiglio, del 21 aprile 2004, relativa alla limitazione delle emissioni di composti organici volatili dovute all'uso di solventi organici in talune pitture e vernici e in taluni prodotti per carrozzeria e recante modifica della direttiva 1999/13/CE*, Gazzetta ufficiale n. L 143 del 30/04/2004 pag. 0087 - 0096.
- [8] Ministro dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare (2017). *Decreto 11 ottobre 2017: Criteri ambientali minimi per l'affidamento di servizi di progettazione e lavori per la nuova costruzione, ristrutturazione e manutenzione di edifici pubblici*. In G.U. 6 novembre 2017, n. 259.
- [9] UNI EN ISO 14020 (2002). *Etichette e dichiarazioni ambientali - Principi generali*. Ente Nazionale Italiano di Unificazione, Milano.
- [10] UNI EN ISO 14024 (2018). *Etichette e dichiarazioni ambientali - Etichettatura ambientale di Tipo I - Principi e procedure*. Ente Nazionale Italiano di Unificazione, Milano.
- [11] UNI EN ISO 14021 (2016). *Etichette e dichiarazioni ambientali - Asserzioni ambientali auto-dichiarate (etichettatura ambientale di Tipo II)*. Ente Nazionale Italiano di Unificazione, Milano.
- [12] UNI EN ISO 14025 (2010). *Etichette e dichiarazioni ambientali - Dichiarazioni ambientali di Tipo III - Principi e procedure*. Ente Nazionale Italiano di Unificazione, Milano.
- [13] American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, *Indoor Air Quality Guide: Best Practices for Design, Construction and Commissioning*, 2009.
- [14] *Regolamento (UE) N. 305/2011 del Parlamento Europeo e del Consiglio del 9 marzo 2011 che fissa condizioni armonizzate per la commercializzazione dei prodotti da costruzione e che abroga la direttiva 89/106/CEE del Consiglio*, Gazzetta Ufficiale dell'Unione Europea, 2011.
- [15] Presidente della Repubblica (2016). *Decreto Legislativo 18 aprile 2016, n. 50: Attuazione delle direttive 2014/23/UE, 2014/24/UE e 2014/25/UE sull'aggiudicazione dei contratti di concessione, sugli appalti pubblici e sulle procedure d'appalto degli enti erogatori nei settori dell'acqua, dell'energia, dei trasporti e dei servizi postali, nonché per il riordino della disciplina vigente in materia di contratti pubblici relativi a lavori, servizi e forniture*. In S.O. alla G.U. 19 aprile 2016, n. 91.

- [16] Ministro dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare (2021). *Decreto 29 gennaio 2021: Criteri ambientali minimi per l'affidamento del servizio di pulizia e sanificazione di edifici e ambienti ad uso civile, sanitario e per i prodotti detergenti*. In GURI 19 febbraio 2021, n. 42.
- [17] Ministro dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare (2017). *Decreto 11 gennaio 2017: Adozione dei criteri ambientali minimi per gli arredi per interni, per l'edilizia e per i prodotti tessili*. In G.U. 28 gennaio 2017, n. 23.
- [18] Commissione Europea, *Regolamento (UE) 2018/2005 della Commissione del 17 dicembre 2018 che modifica l'allegato XVII del regolamento (CE) n. 1907/2006 del Parlamento europeo e del Consiglio concernente la registrazione, la valutazione, l'autorizzazione e la restrizione delle sostanze chimiche (REACH) per quanto riguarda le sostanze bis(2-etilesil) ftalato (DEHP), dibutilftalato (DBP), benzilbutilftalato (BBP) e diisobutilftalato (DIBP)*. In G.U. dell'Unione Europea 18 dicembre 2018.
- [19] Dipartimento federale dell'interno, Ufficio federale della sanità pubblica UFSP, Unità di direzione protezione dei consumatori, *Scheda informativa sui ftalati*, maggio 2019.
- [20] <https://carpet-rug.org/testing/green-label-plus/testing-protocol-and-requirements/>
- [21] Gemeinschaft Umweltfreundlicher Teppichboden (GUT) Aachen, Germany: German Association for Environmentally Friendly Carpets.
- [22] <https://carpet-rug.org/testing/green-label-plus/testing-protocol-and-requirements/>
- [23] <https://carpet-rug.org/testing/seal-of-approval-program/certified-vacuums/>
- [24] United States Environmental Protection Agency (EPA), *Controlling pollutants and sources. IAQ Design Tools for Schools*. <https://www.epa.gov/iaq-schools/controlling-pollutants-and-sources-indoor-air-quality-design-tools-schools>.
- [25] UNI EN 13986 (2015). *Pannelli a base di legno per l'utilizzo nelle costruzioni - Caratteristiche, valutazione di conformità e marcatura*. Ente Nazionale Italiano di Unificazione, Milano.
- [26] A. Barry, D. Corneau, *Effectiveness of barriers to minimize VOC emissions including formaldehyde*. Forest Products Journal 56(9): 38-42.
- [27] U.S. Environmental Protection Agency, *Ventilation techniques: Air out and flush out. Controlling Pollutants and Sources, IAQ Design Tools for Schools*, 2009.
- [28] Indoor Air Quality Info Sheet. Sacramento: California Interagency Working Group on Indoor Air Quality, *Advisory on relocatable and renovated classrooms*, 1996.
- [29] SINPHONIE, *Inquinamento Indoor nelle Scuole e Salute*, Osservatorio Europeo, *Linee guida per un ambiente scolastico sano in Europa*, Joint Research Centre, 2014.
- [30] U.S. Environmental Protection Agency (EPA), *Greening Your Purchase of Cleaning Products: A Guide for Federal Purchasers*.
- [31] International formerly American Society for Testing and Materials (ASTM), *ASTM E1971-05 Standard Guide for Stewardship for the Cleaning of Commercial and Institutional Buildings*.
- [32] Associazione Italiana Agricoltura Biologica (AIAB), *Disciplinare Detergenza Pulita AIAB*.

3) Protezione da condense e muffe

L'umidità rappresenta una delle cause più comuni di insalubrità degli edifici, in quanto ad essa è spesso associata la formazione di microorganismi e muffe, a loro volta responsabili della diffusione di inquinanti microbici nell'aria interna e della degradazione dei materiali edilizi. Le sorgenti che concorrono maggiormente all'incremento dell'umidità, sia nell'aria interna che nelle strutture edilizie stesse, sono molteplici e comprendono il clima esterno, il terreno, le condizioni di posa dei materiali, eventuali infiltrazioni di acqua piovana e la produzione interna di vapore, a sua volta funzione del numero di occupanti.

A partire da queste fonti, è possibile individuare i principali fenomeni responsabili dei problemi di umidità negli edifici scolastici [1]:

- terreni poco drenanti e scarsa impermeabilizzazione delle fondazioni;
- infiltrazioni di acqua nelle strutture dovuta a perdite nel tetto o nelle scossaline;
- involucri con scarsa tenuta all'aria e al vento;
- posa durante la costruzione di materiali bagnati o non completamente asciutti;
- alti livelli di produzione di vapore interno;
- ventilazione e deumidificazione insufficienti;
- formazione di condense superficiali e interstiziali e formazione di muffe.

Ognuno di questi aspetti deve essere affrontato nelle diverse fasi di vita dell'edificio: ad esempio, in fase di progettazione e di costruzione, deve essere salvaguardata l'ermeticità dell'involucro rispetto all'ingresso di acqua piovana e umidità dal terreno, attraverso l'analisi iniziale del terreno circostante, la progettazione accurata dei dettagli costruttivi e l'impiego di materiali con particolari proprietà quali teli impermeabilizzanti o guaine. Contestualmente, deve essere garantita la tenuta all'aria e al vento e il controllo della corretta migrazione del vapore attraverso l'involucro mediante opportuni sistemi, quali barriere e freni al vapore e teli traspiranti, per evitare fenomeni di condensazione interstiziale e in ottica sia di risparmio energetico che di comfort termo-igrometrico interno. Ancora, la risoluzione dei ponti termici in fase di costruzione permette di mitigare la perdita di calore ad essi connessa, evitando temperature superficiali interne troppo basse che rappresentano un rischio per possibile formazione di muffa e condensa superficiale. Va inoltre prestata grande attenzione ai materiali utilizzati, che, se non completamente asciutti, potrebbero rilasciare ulteriore umidità in ambiente, compromettendo la qualità ambientale interna. Infine, si invita a contenere la produzione interna di vapore, prevedendo un sistema di estrazione meccanica localizzato in corrispondenza dei punti di emissione o un impianto di ventilazione centralizzato con cui l'aria possa essere ricambiata ed eventualmente deumidificata.

È corretto precisare come d'inverno, in zone climatiche particolarmente rigide, si possa presentare il problema opposto, ovvero quello di un'umidità relativa interna troppo bassa, responsabile di secchezza della pelle, degli occhi e maggiore desquamazione. È una situazione che si verifica spesso in alcune città del Nord Italia (ad esempio Bolzano) e può essere affrontata mediante l'umidificazione dell'aria in ingresso

o utilizzando opportuni dispositivi. Fortunatamente, nei locali d'insegnamento, vista l'alta concentrazione di persone, la produzione interna di vapore è molto elevata e questo fa sì che tali fenomeni siano pressoché assenti nelle scuole.

3.1) Come prevenire la penetrazione di acqua liquida dal terreno circostante

La protezione dell'edificio dall'ingresso di acqua, sia piovana che di falda, viene garantita dall'utilizzo di materiali e membrane ad elevata impermeabilità. In questo contesto, un buon drenaggio del terreno circostante l'edificio riveste un ruolo chiave per impedire all'acqua di accumularsi intorno alle fondazioni e per preservarne dunque le caratteristiche; analogamente, l'impiego di sistemi, come scossaline e grondaie, che allontanano l'acqua piovana in caso di precipitazioni, contribuiscono al suddetto scopo, evitando che le pareti perimetrali siano interessate dalla pioggia battente. Per ulteriori approfondimenti relativi alla progettazione e all'installazione di tali sistemi, che non verranno trattati nel presente capitolo, si rimanda a letture specialistiche.

Nella trattazione che segue, verranno fornite alcune considerazioni generali circa il drenaggio del terreno e l'impermeabilizzazione delle fondazioni; successivamente, verrà analizzata la parte rimanente dell'involucro, ovvero le pareti esterne perimetrali e la copertura, rispetto alle quali la migrazione del vapore rappresenta una problematica assai delicata.

3.1.1) Drenaggio del terreno

Realizzare un sito che sia sufficientemente drenante permette di allontanare l'acqua dall'edificio in occasione di forti piogge, evitando possibili infiltrazioni e danneggiamenti strutturali. Il drenaggio del terreno è influenzato da molteplici aspetti, tra cui la forma e l'estensione dell'ambiente circostante, le precipitazioni massime stimate, la presenza di condotte e di eventuali ostacoli.

Per quanto riguarda la pendenza del terreno, nella Figura 3.1 viene riportato un esempio di come dovrebbe essere realizzato il livellamento in funzione della distanza dall'edificio [2]:

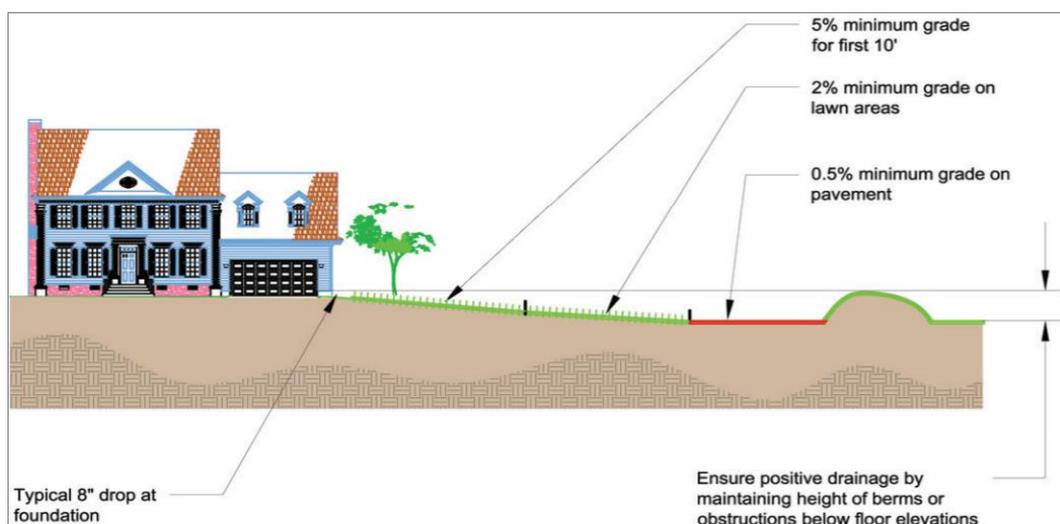


Figura 3.1. Livellamento ottimo del terreno per assicurare un buon drenaggio [2]

Il deflusso dell'acqua è inoltre incentivato dall'utilizzo di materiali drenanti per le superfici esterne pavimentate ad uso pedonale e ciclabile, come i grigliati inerbiti, una cui rappresentazione è fornita in Figura 3.2, il ghiaino, il ciottolato e i masselli porosi, da preferire rispetto all'asfalto, al calcestruzzo e ai lastricati con giunti cementati. Ulteriori tecniche prevedono la realizzazione di canalette di scolo o di bacini per la raccolta e per un primo trattamento dell'acqua piovana.

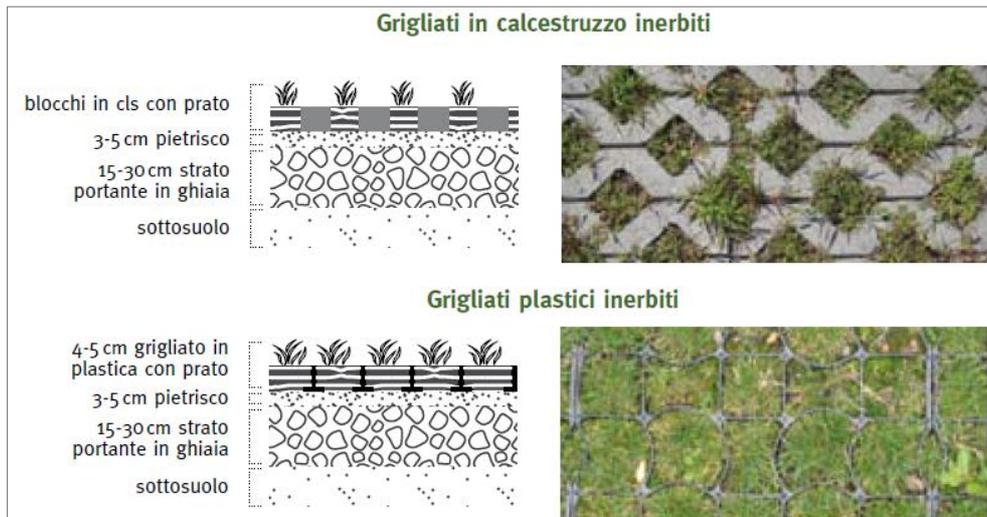


Figura 3.2. Materiali e soluzioni per il drenaggio dell'acqua piovana [3]

Si ricorda che, in Italia, sono in vigore i Criteri Ambientali Minimi [4], che pongono condizioni ben precise in relazione al mantenimento della permeabilità dei suoli e all'impiego di materiali drenanti per le superfici esterne pavimentate di edifici pubblici di nuova costruzione o soggetti a ristrutturazione.

3.1.2) Fondazioni

Le fondazioni di un edificio sono altamente vulnerabili all'umidità, in quanto l'acqua piovana, per gravità, penetra all'interno del terreno, entrando così in contatto con i materiali che costituiscono le fondazioni e lo zoccolo dei muri perimetrali esterni. Inoltre, anche la presenza di falde freatiche può contribuire ad una maggiore umidità del terreno. Di conseguenza, qualsiasi struttura controterra deve essere opportunamente protetta da eventuali infiltrazioni, scegliendo materiali adeguati e realizzando impermeabilizzazioni continue. Queste andrebbero scelte in funzione di:

- tipologia costruttiva del fabbricato, che può essere a contatto con il terreno, integrato in esso o rialzato su pilotis;
- tipo di terreno in cui si trova l'edificio;
- presenza di falde freatiche a livello delle fondazioni;
- tipologia di locali interrati o seminterrati da realizzare.

Un primo intervento riguarda la realizzazione di un'area circostante l'edificio con pendenza non inferiore al 5% per una distanza di almeno 3 metri; si consiglia inoltre, ove possibile, di lasciare una parte del solaio

controterra al di sopra del livello del terreno, per favorire l'evaporazione dell'acqua e l'asciugatura dei materiali; si provveda anche all'installazione di grondaie e pluviali per allontanare l'acqua piovana [2].

La membrana di impermeabilizzazione dovrebbe essere posizionata sopra la platea di fondazione in calcestruzzo alleggerito, come rappresentato schematicamente in Figura 3.3, e lungo tutta la sezione interrata dei muri esterni.

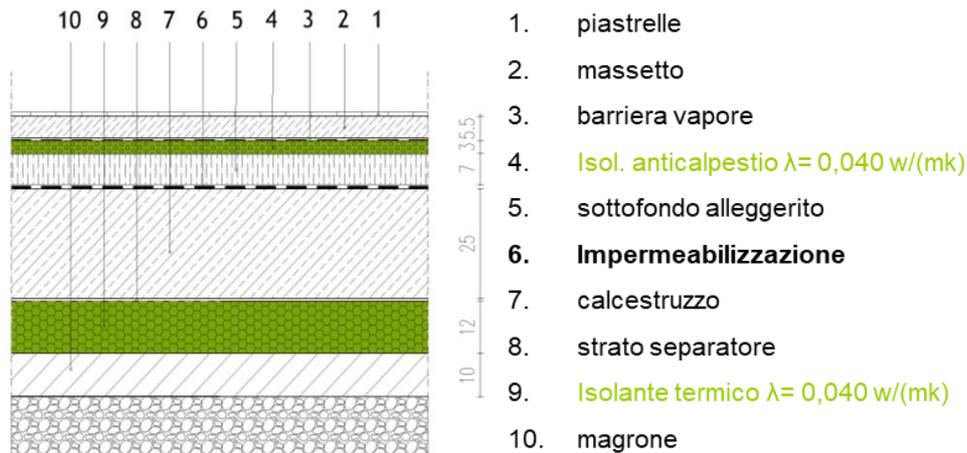


Figura 3.3. Rappresentazione schematica di una platea di fondazione [5]

Nel caso in cui i locali a contatto con il terreno siano riscaldati, si dovrà provvedere anche alla coibentazione delle fondazioni. In particolare, il materiale isolante andrebbe collocato sul lato freddo delle stesse, tra la membrana impermeabile e il magrone, per garantire più facilmente la continuità della coibentazione con quella delle pareti esterne o controterra. Il materiale isolante può essere XPS, vetro cellulare in lastre o vetro cellulare in granuli, in quanto non deve temere l'umidità e deve avere ottima resistenza a compressione e durabilità.

L'impermeabilizzazione di pareti a diretto contatto con il terreno avviene tramite l'applicazione di guaine bituminose, guaine sintetiche (monocomponenti e bicomponenti) liquide o teli impermeabilizzanti, che richiedono una protezione meccanica con membrane bugnate poste tra il terreno e la guaina stessa. Esiste anche la possibilità di utilizzare un calcestruzzo armato "impermeabile", la cui posa necessita però di dettagli specifici per evitare che si abbiano infiltrazioni e passaggi di umidità attraverso i punti di connessione delle strutture. Nel caso in cui i locali interrati siano riscaldati, si invita alla posa di uno strato isolante esterno a protezione termica delle pareti controterra; al di sopra dell'isolamento è possibile posizionare la membrana impermeabilizzante, a sua volta protetta da una guaina bugnata, a diretto contatto con il terreno [6].

La risalita dell'umidità dal terreno è una problematica assai presente anche negli edifici esistenti e ad essa sono associati episodi di muffa e degradazione dei materiali. Ne conseguono problemi strutturali, cattivi odori e un marcato peggioramento della qualità ambientale interna. Questo fenomeno può essere risolto attraverso degli interventi di risanamento non invasivi, come le tecniche a sbarramento e/o impermeabilizzazione di tipo edile, i metodi a barriera chimica, ad elettro-osmosi o elettrofisici ad inversione di polarità, per i quali si rimanda a letture specialistiche.

3.2) Come prevenire la formazione di muffe, condense superficiali e interstiziali

Il contenuto di umidità che caratterizza i materiali dell'involucro può aumentare come conseguenza di molteplici fenomeni, tra cui la migrazione del vapore attraverso lo stesso a causa di differenze di pressione parziale tra interno ed esterno, le infiltrazioni, sia dell'aria che dell'acqua, il trasporto capillare e la condensazione del vapore contenuto nell'aria quando questa viene a contatto con superfici che si trovano a temperature prossime al punto di rugiada. Tutti questi aspetti possono essere mantenuti sotto controllo mediante opportuni accorgimenti da adottare in fase di costruzione: assenza di ponti termici, tenuta all'aria e al vento, installazione di barriere e freni al vapore, utilizzo della ventilazione e di sistemi di controllo dell'umidità interna. Alcuni di questi aspetti verranno trattati nel proseguo, mentre per altri, come l'esercizio della ventilazione, si rimanda ai capitoli precedenti.

3.2.1) Tenuta all'aria e al vento

L'importanza della tenuta all'aria dell'involucro edilizio, in quanto strumento di prevenzione di muffe e condense interstiziali, si è diffusa inizialmente nel campo del residenziale, ma in questi ultimi anni, complice una maggiore diffusione della ventilazione meccanica, sta riscuotendo un grande interesse anche nella realizzazione di uffici e scuole. Sebbene a livello nazionale non esistano delle specifiche di legge su eventuali valori limite da rispettare, i protocolli di certificazione edilizia dedicano alla tematica grande attenzione: ad esempio il protocollo CasaClima School [7] obbliga ad eseguire una verifica qualitativa tramite il Blower Door Test su locali campione per l'individuazione di eventuali problematiche di non adeguata ermeticità dell'involucro.

Per quanto riguarda la nomenclatura, il termine tenuta all'aria indica la capacità di impedire il passaggio di aria dall'interno dell'edificio verso l'esterno. Si realizza generalmente sul lato caldo dei componenti edilizi e serve ad evitare che il vapore acqueo contenuto nell'aria interna, condensando sulle superfici fredde della stratigrafia, possa accumularsi negli elementi costruttivi, peggiorando notevolmente le prestazioni termiche dei materiali, così come il loro stato di conservazione. Si evidenzia inoltre come lo strato di tenuta all'aria possa assumere anche la funzione di freno al vapore. Viceversa, la tenuta al vento è generalmente posizionata sul lato freddo dei componenti edilizi e ha il compito di proteggere lo strato isolante dalle infiltrazioni di aria fredda e talvolta anche dalle intemperie con la funzione di tenuta alla pioggia battente. Tramite questi due differenti strati funzionali si riduce efficacemente la permeabilità all'aria dell'involucro edilizio.

In particolare, un involucro edilizio ad elevata tenuta all'aria crea i presupposti per:

- un consistente risparmio energetico, grazie alla riduzione delle perdite di calore per ventilazione;
- minori rischi legati al trasporto di vapore attraverso gli elementi costruttivi dell'involucro;
- un miglior controllo dell'IAQ a causa del ridotto ingresso di inquinanti dall'esterno;
- l'assenza di correnti d'aria fastidiose;
- un miglioramento delle prestazioni di isolamento acustico dell'edificio;
- un funzionamento ottimale dell'impianto di ventilazione (se presente);

- una garanzia della qualità della realizzazione e di un'accurata posa in opera di impianti e componenti.

Si intuisce, dunque, come la tenuta all'aria sia di fondamentale importanza per assicurare una buona IAQ. Infatti, le infiltrazioni altrimenti presenti potrebbero trascinare all'interno degli ambienti occupati gli inquinanti esterni, così come batteri e allergeni, mentre le esfiltrazioni d'aria potrebbero dar luogo a condensazione interstiziale e crescita di muffa tra gli strati dell'involucro nelle stagioni fredde, soprattutto in presenza di isolamento interno. Un problema analogo lo si osserva in zone calde e umide durante la stagione estiva, in cui l'aria muovendosi dall'esterno verso l'interno incontra superfici via via più fredde. Non da meno, la variazione delle pressioni raggiunte nelle zone alimentate dall'impianto di ventilazione porterebbe allo sbilanciamento dello stesso, limitando l'efficacia del ricambio d'aria rispetto alla rimozione degli inquinanti indoor.

Il sistema di tenuta all'aria consiste nella combinazione di materiali tra loro interconnessi, di giunti sigillanti e di adesivi. In un tale contesto, ciascun dettaglio costruttivo, seppur all'apparenza insignificante, può ripercuotersi negativamente sulla classe finale raggiunta e sulle prestazioni energetiche complessive dell'edificio. Un esempio è rappresentato dalla sigillatura completa dei cavi elettrici e dei tubi corrugati mediante manicotti, tappi a tenuta, resine, siliconi, colle e raccordi autoadesivi, come rappresentato in Figura 3.4. Ancora, per gli edifici in muratura, un requisito fondamentale consiste nella posa accurata dell'intonaco interno, che deve risultare continuo.

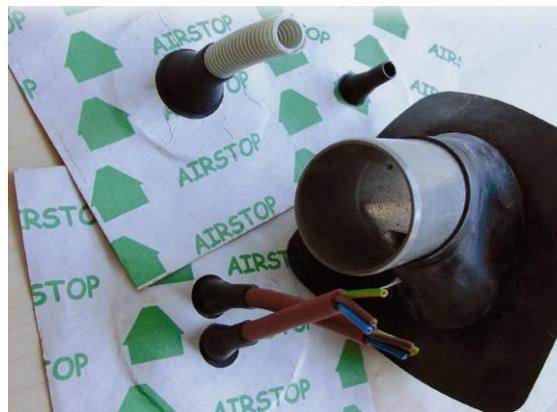


Figura 3.4. Dettaglio della sigillatura di cavi e tubi corrugati [5]

La sigillatura dei serramenti merita invece un discorso a parte. Infatti, la tenuta all'aria e la tenuta al vento del nodo finestra (giunto primario) sono fondamentali per garantire comfort interno, ridotte dispersioni termiche, assenza di spifferi e un buon isolamento acustico, ma anche per ridurre il rischio di formazione di muffa e condensa. La connessione tra il serramento e la parete va quindi studiata prevedendo una serie di accorgimenti adatti allo scopo:

- per garantire la tenuta all'aria sul lato interno è possibile utilizzare nastri adesivi (con funzione freno/barriera vapore) per coprire e proteggere il giunto tra muratura e controtelaio, collegandoli al sistema di tenuta all'aria studiato per la parete. I nastri possono essere anche intonacabili;

- per la connessione intermedia fra telaio e controtelaio si utilizzano invece dei nastri autoespandenti multifunzione, rappresentati in Figura 3.5, posati lungo tutto il perimetro del serramento. Essi sono in grado di offrire prestazioni di tenuta all'aria, di isolamento termoacustico e di regolazione del flusso di vapore;

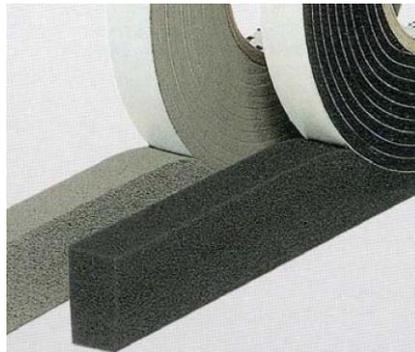


Figura 3.5. Esempi di nastri autoespandenti [5]

- per garantire la tenuta alla pioggia e al vento sul piano funzionale verso l'esterno è necessario utilizzare nastri (BG1) resistenti all'acqua e ai raggi ultravioletti. A differenza dei nastri per la tenuta all'aria, che possono avere funzione di freno a vapore, i nastri per la tenuta al vento devono essere aperti alla diffusione del vapore, in modo tale da favorire l'espulsione all'esterno di eventuale umidità intrappolata nel nodo.

Per il raccordo del tetto in legno con la parete in muratura, si deve utilizzare un nastro adesivo idoneo al collegamento dell'intonaco della parete in laterizio con gli elementi della copertura in legno. Si vuole sottolineare come il tetto rappresenti un elemento chiave per il controllo dell'umidità, in quanto parte integrante dello strato di tenuta all'aria e al vento dell'involucro. A tal proposito, tutte le interruzioni della copertura, come sfiati, camini, bucatore per finestre a tetto, fori per il passaggio di impianti, travi e travetti, devono essere sigillati a regola d'arte.

Si ricorda inoltre come non tutti i materiali siano in grado di garantire la tenuta all'aria. Possono considerarsi a tenuta all'aria solo quei materiali la cui permeabilità all'aria, determinata in condizioni di differenza di pressione di 50 Pa, rispetta il limite: $q_{50} < 0.1 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$. In Tabella vengono elencati alcuni materiali che soddisfano tale vincolo.

Tabella 3.1. Permeabilità all'aria di alcuni materiali da costruzione che rispettano la condizione limite $q_{50} < 0.1 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$ e che possono essere considerati a tenuta all'aria

Materiale	Valore q_{50} [$\text{m}^3/\text{m}^2\text{h}$]
Pannelli in compensato	0.004 - 0.02
Pannelli in fibra di legno dura e pannelli OSB	0.001 - 0.003
Legno massello	> 0.0003
Foglio in polietilene PE	0.0015
Guaina bituminosa	0.008 - 0.02

Ciò nonostante, è necessario accertarsi che i materiali utilizzati, anche se appartenenti alla Tabella 3.1, siano effettivamente certificati a tenuta all'aria. Ad esempio, non tutti i pannelli OSB sono adatti alla tenuta all'aria e analogamente solo i pannelli in xlam a 5 strati fanno un'adeguata tenuta all'aria, a differenza invece di quelli a 3 strati.

È altresì evidente come l'impiego di materiali che soddisfano il requisito $q_{50} < 0.1 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$ non garantisca automaticamente la tenuta all'aria dell'involucro: questa deve essere realizzata mediante opportuni accorgimenti a seconda della tipologia di struttura considerata. Ad esempio, i sistemi a secco richiedono l'applicazione di guaine e nastri per la sigillatura di tutte le possibili fughe tra un pannello e l'altro, mentre, data una parete in laterizio o in blocchi di calcestruzzo cellulare, la continuità strutturale tra i singoli elementi viene assicurata dalla malta di collegamento e dalla posa dell'intonaco. Al progettista spetterà dunque il compito di studiare e verificare la corretta tenuta all'aria di tutte le strutture e di tutti i dettagli costruttivi dell'edificio in esame.

Nell'ipotesi in cui siano presenti delle zone termiche con diverse caratteristiche in termini di temperatura e umidità relativa, è bene che la tenuta all'aria venga garantita anche tra questi ambienti.

La verifica della corretta esecuzione della tenuta all'aria avviene mediante l'applicazione di un Blower Door Test secondo il metodo di pressurizzazione dell'edificio. In un'apertura (porta o finestra) si inserisce un telaio rigido chiuso da un telo, in cui viene introdotto un ventilatore al fine di creare una differenza di pressione tra interno ed esterno di 50 Pa. Per mantenere questo valore, il ventilatore deve ricambiare una certa quantità di aria che, misurata e suddivisa per il volume netto dell'edificio, definisce il cosiddetto valore n_{50} , espresso in h^{-1} . Più piccolo è il valore n_{50} , migliore è la tenuta all'aria dell'edificio. Il Blower Door Test può essere utilizzato anche per individuare i punti critici responsabili di una cattiva ermeticità dell'involucro. Il test si esegue una volta terminata l'opera; ciò nonostante, sarebbe opportuno condurre un ulteriore test al "grezzo", cioè durante la fase di costruzione dopo aver completato lo strato di tenuta all'aria, in modo da evidenziare con facilità gli eventuali punti critici da risolvere.

3.2.2) La risoluzione dei ponti termici contro il rischio di muffa e di condensa superficiale

I fenomeni di condensazione superficiale e di formazione di muffa sono tipici di edifici poco isolati e/o in cui c'è la presenza di ponti termici. Queste, assieme ad elevati tassi di umidità relativa, rappresentano le cause principali della formazione di muffa sulle superfici interne. È importante precisare come la muffa possa manifestarsi anche nel caso in cui venga mantenuta un'umidità relativa superiore al 60-65% per diversi giorni consecutivi e quindi in condizioni "meno critiche" rispetto a quelle di saturazione. Di conseguenza, evitare la formazione di muffa significa anche evitare gli episodi di condensazione: ad esempio, considerando un ambiente con temperatura interna di 20 °C e umidità relativa del 65%, è necessario garantire che la temperatura superficiale interna sia in ogni punto maggiore di 16,7 °C; valori inferiori possono invece essere tollerati in presenza di un impianto di ventilazione meccanica controllata in grado di regolare automaticamente il tenore di umidità. Il calcolo deve comunque essere effettuato in conformità alla normativa tecnica vigente, come la UNI EN ISO 13788 [8], a seconda delle diverse classi di umidità interna.

Riprendendo la definizione contenuta nella UNI EN ISO 10211 [9], i ponti termici rappresentano delle zone dell'involucro edilizio in cui si concentra la dispersione di calore tra interno riscaldato ed esterno e che

quindi presentano temperature superficiali interne inferiori rispetto alle superfici circostanti. Sono causati dalla discontinuità termica di materiali accoppiati oppure da discontinuità di tipo “geometrico”. Sebbene alcuni di essi non siano evitabili, è sempre possibile mitigarne la perdita di calore mediante opportuni accorgimenti.

I ponti termici possono essere distinti in:

- ponti termici geometrici, ovvero determinati dalla geometria della costruzione, come angoli o spigoli;
- ponti termici costruttivi, derivanti dalle discontinuità associate all'accoppiamento di due o più materiali caratterizzati da differenti prestazioni termiche. Ne sono un esempio i pilastri in calcestruzzo armato che si appoggiano ad una parete in muratura, i cordoli non coibentati e i balconi in calcestruzzo armato che attraversano una parete.

Entrambi si propagano lungo l'intera struttura edilizia, dando luogo ad una “rete” di ponti termici, come quella rappresentata nell'esempio di Figura 3.6, dove vengono evidenziati i nodi critici dell'edificio.

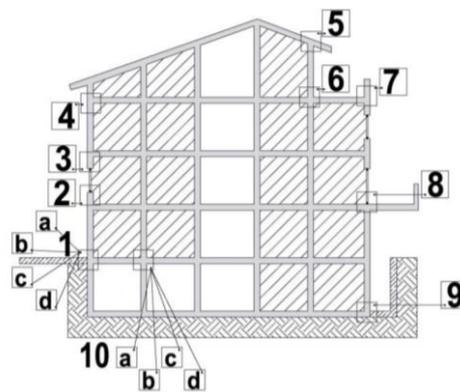


Figura 3.6. Possibili ponti termici di un edificio [10]

Oltre a favorire la formazione di muffe e di condense superficiali, compromettendo la salubrità degli ambienti interni, i ponti termici peggiorano notevolmente le prestazioni energetiche dell'edificio e riducono il comfort termo-igrometrico. Questi effetti negativi possono essere risolti mediante una coibentazione perimetrale detta “cappotto” effettuata a regola d'arte. L'isolamento deve essere continuo, con particolare attenzione alle discontinuità geometriche e ai nodi costruttivi che presentano una qualche variazione termica locale, per i quali devono essere adottati opportuni accorgimenti, come il taglio termico in corrispondenza degli aggetti.

Si vuole sottolineare come la risoluzione dei ponti termici mediante coibentazione interna risulti più complessa ed onerosa rispetto a quella esterna: spesso, è necessario proseguire l'isolamento con dei risvolti anche su parte degli elementi costruttivi interni (detti incamiciamenti), in modo da evitare punti critici con temperature superficiali interne a rischio condensa/muffa.

Infine, nel caso in cui ci fosse l'impossibilità di correggere il ponte termico, come in molte ristrutturazioni, è possibile implementare dei meccanismi di protezione attiva dei ponti termici, che consistono

nell'installazione di cavi scaldanti elettrici o nell'impiego di impianti idronici in grado di riscaldare le sole zone affette dal ponte termico.

3.2.3) Membrane e materiali igroscopici contro il rischio di condense interstiziali

A differenza delle muffe e della condensa superficiale, i fenomeni di condensazione interstiziale riguardano soprattutto gli edifici isolati internamente, nei quali la presenza dell'isolamento termico consente maggiori temperature superficiali interne e "sposta" l'eventuale punto di condensa all'interno dell'elemento edilizio. Le maggiori criticità vengono di solito riscontrate in corrispondenza dell'interfaccia tra lo strato di coibentazione interna e quello immediatamente successivo, più freddo rispetto al primo. L'umidità che ne deriva può dar luogo a sub-efflorescenze e marcescenza dei materiali, peggiorando le prestazioni termiche dell'involucro e intaccando l'integrità strutturale dell'intero edificio. Per prevenire tali fenomeni, si suggerisce l'impiego di soluzioni (strati funzionali) in grado di controllare la migrazione del vapore acqueo, come i freni al vapore, le barriere al vapore e le membrane igrovariabili. Nel proseguo, verranno fornite alcune raccomandazioni di carattere generale da rispettare nell'installazione di queste soluzioni, sebbene la scelta della relativa posizione e tipologia andrebbe effettuata a valle di un'analisi igrotermica dettagliata in funzione del pacchetto costruttivo e delle condizioni di esercizio considerate. Infatti, si vuole rimarcare come il rischio di condensa interstiziale, sebbene venga favorito dalla presenza dell'isolamento interno, possa manifestarsi anche in circostanze diverse. Pertanto, le caratteristiche dello strato funzionale, così come il comportamento igrotermico di un dettaglio o di una struttura edilizia, devono essere sempre verificati da parte del progettista.

Nello specifico, la formazione di condensa interstiziale avviene se, durante il processo di migrazione dell'umidità attraverso il pacchetto costruttivo, l'andamento della pressione parziale di vapore supera, in un punto interno alla struttura, l'andamento della pressione di saturazione. A tale proposito, in Figura 3.7 viene proposto il confronto tra una struttura con coibentazione esterna (a sinistra), caratterizzata dall'assenza di condensa, e una struttura simile ma con l'isolante posizionato sul lato interno (a destra), che comporta la formazione di condensa interstiziale sulla superficie fredda dello stesso.

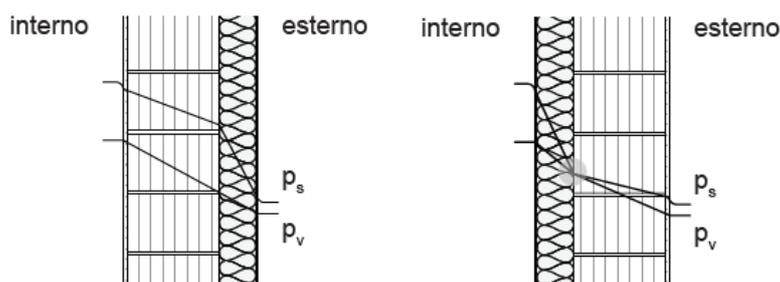


Figura 3.7. Andamento della pressione parziale del vapore e della pressione di saturazione in una struttura con isolante esterno (a sinistra) e con isolante interno (a destra)

Si sottolinea, inoltre, come l'andamento della pressione parziale del vapore attraverso una struttura edilizia dipenda non solo dalle condizioni di esercizio interne, dalla temperatura e dall'umidità relativa, ma anche dalla resistenza offerta dalla struttura al passaggio del vapore. Questa resistenza può essere più o meno elevata a seconda dei singoli elementi costituenti la struttura stessa: infatti, prodotti come

schermi freni al vapore, membrane traspiranti e barriere al vapore si distinguono in base al valore del parametro S_d , che corrisponde al prodotto tra il fattore di resistenza alla diffusione del vapore (μ) e lo spessore in metri del materiale in esame. Perciò, da un punto di vista qualitativo, il parametro S_d indica lo strato d'aria equivalente in metri che oppone la stessa resistenza al passaggio di vapore da parte del materiale stesso. In particolare, la norma UNI 11470 [11], riporta la seguente classificazione:

- $S_d \leq 0,1 m$: membrana altamente traspirante, impermeabile all'acqua e altamente aperta alla diffusione del vapore;
- $0,1 m < S_d \leq 0,3 m$: membrana traspirante, impermeabile all'acqua e aperta alla diffusione del vapore;
- $2 m < S_d \leq 100 m$: schermo freno al vapore, che impedisce totalmente il passaggio di acqua e parzialmente quello del vapore;
- $S_d > 100 m$: barriera al vapore, impermeabile all'acqua e alla diffusione del vapore;

Di seguito alcune regole generali da tenere a mente nella scelta tra freno e barriera al vapore:

- evitare di utilizzare barriere al vapore quando un freno potrebbe risultare sufficiente ad evitare fenomeni di condensazione;
- evitare, se possibile, di installare barriere al vapore su entrambi i lati di un pacchetto costruttivo;
- utilizzare schermi freni al vapore per strutture con ventilazione efficaci o con uno strato esterno permeabile al vapore;
- impiegare barriere al vapore o schermi freni al vapore igrovariabili per strutture senza ventilazione o con rivestimento esterno poco o non permeabile al vapore;
- installare barriere al vapore per ambienti ad elevata umidità relativa, come piscine e lavanderie.

Esistono anche delle membrane in grado di modificare la propria resistenza alla diffusione del vapore a seconda delle condizioni di esercizio e perciò conosciute come membrane igrovariabili. Queste si comportano come dei freni al vapore nei mesi invernali, mentre in estate favoriscono la migrazione del vapore verso l'interno per consentire l'asciugatura dei materiali edili.

In alternativa all'installazione di membrane, freni e barriere al vapore, è possibile utilizzare dei materiali in grado di trasportare acqua in forma liquida, assorbendola al proprio interno. Questi, noti come materiali igroscopici o materiali capillarmente attivi, sono aperti alla diffusione del vapore e consentono una gestione ottimale dell'umidità interna. È il caso del calcio silicato, del silicato di calcio idrato, della fibra di legno, della perlite e della cellulosa. Grazie alle loro caratteristiche, possono essere applicati all'interno per la coibentazione di pareti, solai e tetti freddi, oltre che per la mitigazione dei ponti termici.

In generale, si suggerisce di verificare che il valore di resistenza alla diffusione del vapore degli strati esterni sia inferiore rispetto a quello degli strati interni, in modo tale che la struttura traspiri correttamente e conduca il vapore verso l'esterno. Quindi, data una certa stratigrafia, la probabilità che insorgano fenomeni di condensa interstiziale per diffusione del vapore può essere minimizzata se:

- la resistenza termica aumenta passando dal lato caldo al lato freddo;
- la resistenza al passaggio del vapore diminuisce progressivamente passando dal lato caldo al lato freddo.

Tutto ciò, ovviamente, vale nell'ipotesi di una perfetta ermeticità dell'involucro, in modo che non ci siano fenomeni convettivi all'interno delle pareti.

Per comprendere il ruolo svolto dalle tecnologie appena esposte, vengono messe a confronto due diverse strategie per isolare una stratigrafia dall'interno:

- 1) isolamento interno a tenuta di vapore, attuato mediante una barriera al vapore (Figura 3.8, a sinistra): non consente l'accumulo di umidità nei punti critici, in quanto viene inibita la migrazione del vapore attraverso l'involucro, impedendone di fatto la condensazione sul lato più freddo dell'isolante. Ciò, però, comporta uno scarso potenziale di asciugatura;
- 2) isolamento interno aperto alla diffusione del vapore o con materiali capillari attivi (Figura 3.8, a destra): consente l'accumulo di umidità e quindi la possibile formazione di condensa nei punti critici. Allo stesso tempo, permette il trasporto di acqua liquida ed è quindi caratterizzato da un alto potenziale di asciugatura.

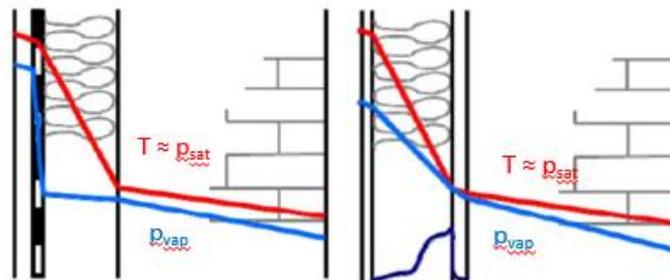


Figura 3.8. Confronto tra una struttura con barriera al vapore (a sinistra) e con materiali capillari attivi (a destra)

Si intuisce pertanto come la barriera al vapore impedisca la diffusione di vapore, facendo sì che questo si accumuli in un punto sufficientemente caldo. Viceversa, utilizzando un freno al vapore e un materiale capillare attivo, viene mantenuta la diffusione del vapore attraverso l'isolante. In questo modo, durante l'inverno, il vapore raggiunge il punto freddo della stratigrafia, posizionato tra lo strato di coibentazione e il muro, e qui condensa. In estate, però, l'umidità accumulata viene rilasciata verso l'interno dal materiale igroscopico, sfruttando il trasporto capillare liquido. Per poter operare in modo corretto, preservando l'integrità della struttura, è fondamentale verificare che l'aumento dell'umidità all'interno della stratigrafia non superi la soglia critica, ovvero rimanga inferiore al 90%.

Di seguito, vengono proposti i risultati di un'analisi igrotermica condotta a Bolzano e applicata ad un muro in pietra con coibentazione interna, in funzione di diverse strategie di isolamento termico interno. In particolare, in Figura 3.9 viene rappresentato l'andamento dell'umidità relativa (UR) nello strato di colla tra isolante e muro, essendo il punto più critico in relazione al rischio di condensazione interstiziale.

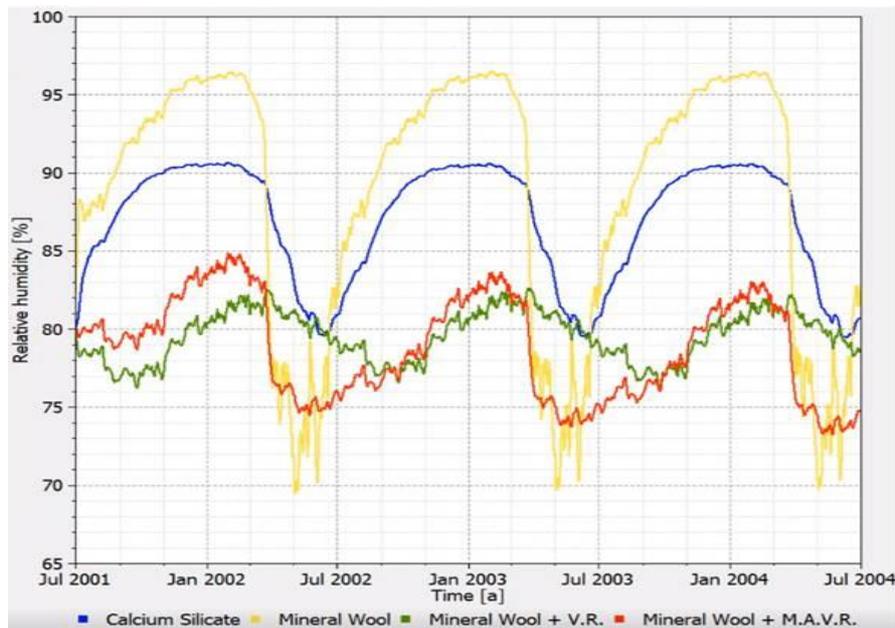


Figura 3.9. Andamenti dell'umidità relativa nello strato di colla tra isolante e muro in funzione di diversi materiali

Con la lana minerale (curva gialla), l'UR supera il valore critico del 90% nei mesi invernali, per poi asciugarsi velocemente in quelli estivi. Aggiungendo un freno al vapore con S_d pari a 20 m (curva verde), l'UR sale, poiché la membrana non ha un S_d infinito, ma questo aumento è più contenuto rispetto al caso precedente e il processo di asciugatura è più lento (minore potenziale di asciugatura). Se invece del freno al vapore venisse utilizzata una membrana igrovariabile con $2 < S_d < 10$ m (curva rossa), si verificherebbe un incremento dell'UR, ma allo stesso tempo l'asciugatura inizierebbe prima e sarebbe più rapida (maggiore potenziale di asciugatura). Infine, impiegando un pannello in calcio silicato (curva blu), l'UR raggiunge il valore critico, per poi diminuire nei mesi estivi fino a valori prossimi all'80%.

La soluzione migliore deve essere valutata caso per caso, a seconda dei risultati ottenuti dalle simulazioni. Ad esempio, le membrane igrovariabili favoriscono il processo di asciugatura verso l'interno, liberando l'umidità residua accumulata durante la stagione di riscaldamento, mentre in inverno si comportano come dei freni al vapore, a causa dell'inversione del fenomeno di diffusione del vapore. Pertanto, possono essere utili quando sul lato esterno del pacchetto costruttivo è presente una barriera che impedisce il processo di asciugatura.

Indipendentemente dalla soluzione adottata, è necessario prestare la massima attenzione alle operazioni di posa delle membrane, dei freni e soprattutto delle barriere, verificandone la corretta esecuzione e assicurando quindi una perfetta tenuta all'aria, pena un incremento consistente del trasporto di vapore. Inoltre, per un buon esercizio delle membrane igrovariabili e analogamente delle barriere al vapore, è importante verificare che, prima della posa, i materiali con cui esse vengono a contatto siano completamente asciutti.

I materiali capillari attivi tollerano maggiormente gli errori progettuali, ma necessitano di un incollaggio senza vuoti d'aria e di un intonaco interno posato a regola d'arte.

Sebbene i muri perimetrali esterni con isolamento sul lato interno rappresentino la situazione più delicata, un altro elemento a cui porre particolare attenzione è dato dal tetto. In particolare, è opportuno che il pacchetto costruttivo sia quanto più traspirante possibile e caratterizzato da una buona diffusione al vapore, evitando così la formazione di condensa negli strati della copertura e nel materiale isolante. A tale scopo, è importante che il tetto sia privo di barriere al vapore, le quali, se male eseguite, possono compromettere la durabilità del pacchetto di copertura. Viceversa, deve essere salvaguardata la funzione di freno al vapore, attraverso la posa di materiali dedicati o sfruttando lo strato di tenuta all'aria già presente, costituito da teli, membrane, pannelli opportunamente nastrati e dall'intonaco. In caso di rifacimento della copertura, si consiglia di rimuovere l'impermeabilizzazione esistente e procedere solo successivamente alla posa dell'isolamento termico sul lato esterno del solaio. Generalmente, è necessario installare all'estradosso del solaio esistente un freno al vapore per una migliore gestione dell'umidità interna ed evitare il rischio di formazione di condensa interstiziale. Per altre configurazioni della copertura, la posa del freno al vapore deve essere studiata appositamente. A tal proposito, si rimanda a letture dedicate.

3.2.4) Analisi igrotermica dei componenti edilizi

Dal punto di vista legislativo, in relazione alle prescrizioni comuni per gli edifici di nuova costruzione, per gli edifici oggetto di importanti ristrutturazioni o per gli edifici sottoposti a ristrutturazione energetica, il D.M. 26 giugno 2015 [12] ha imposto la verifica dell'assenza del rischio di formazione di muffe e di condensazioni interstiziali nel caso di interventi che riguardino le strutture opache delimitanti il volume climatizzato verso l'esterno. L'analisi deve essere effettuata in conformità alla normativa tecnica vigente, come la UNI EN ISO 13788 [8], utilizzando, per la definizione delle condizioni interne di riferimento, il metodo delle classi di concentrazione proposto dalla norma stessa. In alternativa, qualora esista un sistema di controllo dell'umidità relativa, è possibile adottare delle condizioni diverse per eseguire le medesime verifiche.

Sebbene il procedimento proposto dalla UNI EN ISO 13788 sia in grado di fornire dei risultati attendibili per la verifica dell'assenza di muffa e condensazione superficiale, per l'analisi del rischio di condensazione interstiziale sono da preferire dei metodi dinamici ai sensi della UNI EN 15026 [13]. Infatti, con l'aumentare della complessità del pacchetto costruttivo, aumenta anche l'interazione dei fenomeni fisici rilevanti e spesso una valutazione igrotermica eseguita con il metodo stazionario di Glaser può non essere sufficiente. Ciò è dovuto alle numerose semplificazioni adottate, a cui sono associate altrettanti fonti di errore.

In particolare, i fenomeni ignorati dal metodo di Glaser sono [14]:

- la variazione delle proprietà dei materiali in funzione del contenuto di umidità;
- la risalita capillare e il trasporto di acqua liquida all'interno dei materiali;
- la variazione delle condizioni al contorno, che non sono costanti durante tutto l'arco del mese;
- la capacità igroscopica dei materiali;
- l'effetto della radiazione solare e dell'emissività delle superfici.

A differenza del calcolo stazionario, il metodo dinamico si basa su equazioni di bilancio per la conservazione del calore e della massa, tenendo conto anche dei fenomeni fisici sopra elencati che vanno a descrivere in maniera più esaustiva quanto accade all'interno dei componenti costruttivi. Un'analisi di questo tipo può essere condotta mediante opportuni software di calcolo, come il ProCasaClima Hygrothermal [15].

Si consiglia di effettuare l'analisi igrotermica secondo il metodo dinamico in presenza di carichi di umidità esterna molto importanti, come nei casi di risalita capillare e pioggia battente, o, più in generale, quando si riscontrano delle problematiche dal punto di vista della diffusione del vapore, tipiche di costruzioni con isolamento interno o di strutture non ventilate con uno strato esterno impermeabilizzante, come i tetti piani.

Una questione molto importante riguarda l'interpretazione degli output di una simulazione igrotermica in regime dinamico. A tale proposito, vengono fornite alcune raccomandazioni da rispettare affinché una struttura si comporti correttamente da un punto di vista igrometrico:

- il contenuto di umidità in tutti gli strati al termine della simulazione dovrebbe essere inferiore rispetto al valore iniziale;
- il contenuto di umidità del materiale non dovrebbe mai superare il valore critico indicato dal produttore;
- in generale, è bene che i materiali non superino il 90-95% di umidità relativa;
- il livello di saturazione, ossia i m³ di acqua presenti nel materiale diviso i m³ di spazio che l'acqua può occupare nello stesso, dovrebbe essere inferiore al 30%.

Esistono poi delle prescrizioni dedicate specificatamente al legno [16]: tutti i legni duri (massiccio, lamellare, ecc.) dovrebbero avere un contenuto di umidità in kg di acqua su kg di materiale inferiore al 20%, mentre per i prodotti derivati dal legno e di origine vegetale il valore limite si attesta al 18%.

3.3) Mantenere l'edificio in pressione o in depressione

In presenza di un impianto di ventilazione meccanica, anche la pressurizzazione dei vari ambienti gioca un ruolo importante nel controllo dell'umidità e nella gestione dei rischi associati alla formazione di condensa e muffa. Infatti, la differenza di pressione statica tra interno ed esterno influenza la presenza e l'entità delle infiltrazioni/esfiltrazioni lungo l'involucro edilizio. In particolare, si raccomanda il rispetto delle seguenti condizioni di esercizio [17]:

- mantenere una pressione positiva all'interno degli ambienti raffrescati meccanicamente quando all'esterno il clima è molto caldo e umido;
- mantenere una pressione positiva nelle zone occupate quando la qualità dell'aria esterna è molto scarsa; ciò giustifica l'importanza di mantenere le aule scolastiche in pressione, ad eccezione delle scuole poste in zone climatiche molto rigide;

- nei climi particolarmente rigidi, è bene che l'edificio si trovi ad una pressione simile o leggermente inferiore a quella esterna per evitare le esfiltrazioni, le quali potrebbero causare condensazione interstiziale e il deterioramento dei materiali dell'involucro. Per lo stesso motivo, gli ambienti caratterizzati da una produzione di vapore consistente andrebbero mantenuti in depressione;
- nei climi moderati, per tenere conto delle condizioni critiche che possono essere raggiunte in estate e in inverno, gli edifici dovrebbero essere equipaggiati con un controllo del punto di rugiada: quando la temperatura di rugiada esterna supera quella interna, il sistema HVAC dovrebbe passare da una pressione "neutrale" ad una pressione positiva. Questo contribuisce a ridurre le infiltrazioni e il carico di deumidificazione.

Per garantire la pressione richiesta dai singoli locali in tutte le condizioni di esercizio, devono essere valutati attentamente i carichi che insistono sull'edificio, legati soprattutto al vento e alla differenza di temperatura tra interno ed esterno. Infatti, la semplice assunzione che la portata d'aria esterna in ingresso sia più elevata di quella esausta in uscita non è sufficiente ad assicurare che la pressione interna all'edificio sia maggiore di quella esterna. Di conseguenza, spetterà ai tecnici verificare che le pressioni siano conformi a quelle di progetto durante tutto il funzionamento dell'impianto, a seconda della posizione delle bocchette e quindi della strategia di ventilazione messa in pratica. Nell'ipotesi di un corretto bilanciamento, queste procedure acquistano le caratteristiche di una semplice formalità e basterà allora verificare che la portata di aria esterna, di aria esausta, di aria immessa e di aria estratta siano tali da mantenere i vari ambienti ai livelli di pressione previsti. Ciò dovrebbe essere effettuato non solo nelle condizioni nominali di funzionamento, ma anche in quelle di off-design.

Ancora, si ricorda l'importanza di esercitare correttamente l'impianto di areazione quando una parte dell'edificio è soggetta ad interventi di riqualificazione, per evitare che i relativi inquinanti possano diffondersi nelle zone occupate. In tali circostanze, è opportuno verificare che le zone occupate siano mantenute in pressione o che gli ambienti soggetti ad interventi siano mantenuti in depressione.

Una delle strategie di controllo più diffuse, raffigurata schematicamente in Figura 3.10 (a sinistra), prevede la gestione del ventilatore di estrazione al fine di garantire una pressione statica positiva nel condotto di ripresa e la modulazione delle serrande di espulsione all'esterno per regolare la pressione statica nell'edificio. Un sensore di pressione localizzato nel plenum di estrazione aggiusta la capacità del ventilatore di estrazione, attraverso la variazione di frequenza della macchina stessa. Inoltre, ulteriori sensori monitorano la differenza di pressione tra interno ed esterno e modulano di conseguenza la posizione delle serrande. Oltre a questa modalità di controllo, esiste una seconda strategia di regolazione della pressione, che prevede l'impiego di un ventilatore di espulsione posto subito a monte dell'omonima serranda, come rappresentato in Figura 3.10 (a destra).

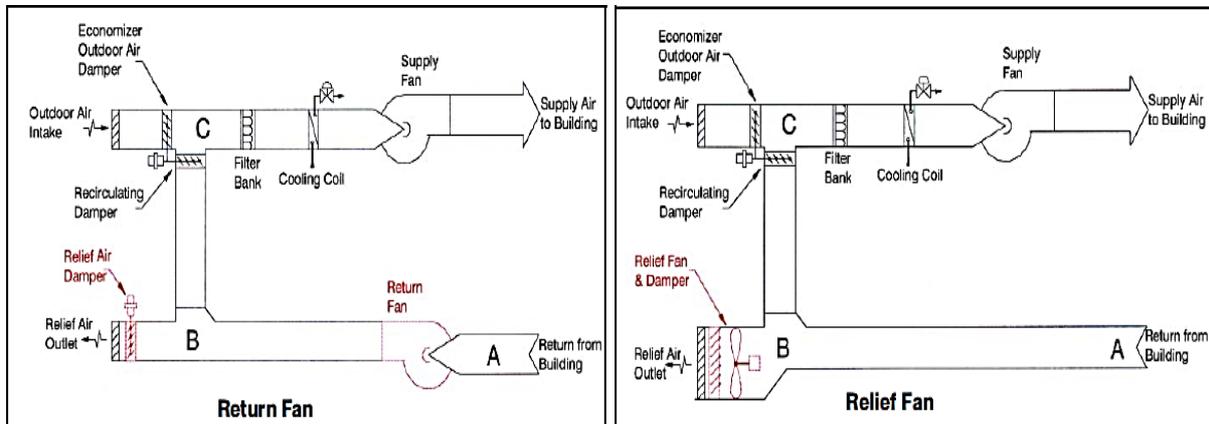


Figura 3.10. Confronto tra due strategie di controllo: con ventilatore di estrazione (a sinistra) e con ventilatore di espulsione (a destra) [18]

Rispetto alla prima, questa seconda configurazione garantisce minori costi d'esercizio, una maggiore flessibilità impiantistica e un controllo più semplice soprattutto con sistemi a portata variabile; allo stesso tempo presenta degli svantaggi ai bassi carichi e una maggiore probabilità che l'aria esterna possa penetrare nel plenum quando il ventilatore di espulsione è spento. In alternativa, è anche possibile utilizzare solamente la serranda di espulsione, sebbene questa opzione sia adatta solamente ad impianti di piccola taglia.

In generale, la strategia con ventilatore di estrazione è adatta ad applicazioni con elevate perdite di carico, come i sistemi con condotte di estrazione; viceversa, la strategia con ventilatore di espulsione è indicata quando le perdite di carico nella sezione di ritorno sono piccole, come nel caso di un plenum di estrazione. Per ulteriori approfondimenti si rimanda a Stanke & Bradley [18] e a Taylor [19].

In tale contesto, è di fondamentale importanza che il sistema di distribuzione dell'impianto di ventilazione sia perfettamente ermetico in modo da evitare qualsiasi perdita di aria, che, altrimenti, comporterebbe una depressurizzazione dell'edificio e il conseguente peggioramento della qualità del ricambio d'aria.

3.4) Condizioni igrometriche interne di comfort

Oltre a mantenere in pressione o in depressioni i vari ambienti, l'impianto di ventilazione dovrebbe anche essere in grado di controllare l'umidità relativa interna, non solo per raggiungere il livello di comfort termo-igrometrico desiderato, ma anche per prevenire i fenomeni di condensazione e formazione di muffa. Un'elevata umidità, inoltre, favorisce la crescita di colonie di funghi e batteri. Per questo motivo, si suggerisce di rispettare le condizioni termiche e igrometriche indicate nella UNI 10339 [20], la quale prescrive un'umidità relativa interna compresa tra il 35 e il 45% nel periodo invernale e tra il 50 e il 60% nei mesi estivi.

In particolare, in presenza di un'unità di trattamento dell'aria, tali valori possono essere mantenuti per tutto il periodo di esercizio dell'impianto nell'ipotesi di un corretto dimensionamento sia della batteria di raffreddamento e deumidificazione, sia del vaporizzatore isoterma, da preferire rispetto al saturatore adiabatico per prevenire la proliferazione del batterio Legionella.

Se non viene effettuato il trattamento dell'aria, il controllo dell'umidità interna può essere realizzato solo attraverso la regolazione della portata: in tal caso, è utile installare dei sensori per il monitoraggio dei parametri termo-igrometrici interni e/o esterni al fine di ottimizzare l'apertura dei serramenti o di comandare le serrande dell'aria di rinnovo e di ricircolo di un eventuale impianto VMC. Inoltre, se nel suddetto impianto fosse presente uno scambiatore di calore entalpico, sarebbe anche possibile trasferire l'umidità sotto forma di vapore acqueo dal flusso con pressione di vapore più alta a quello con pressione più bassa, dando luogo ad un processo di umidificazione in inverno e di deumidificazione in estate.

Ciò nonostante, tutte queste operazioni potrebbero non essere sufficienti durante la stagione estiva, quando l'aria calda proveniente dall'esterno si raffredda e ciò comporta un incremento dell'umidità relativa interna. Per far fronte a tali circostanze, si suggerisce l'adozione di sistemi dedicati come essiccatori e deumidificatori, soprattutto nei climi molto umidi. Viceversa, si sconsiglia l'utilizzo degli umidificatori ambiente, che possono contribuire alla diffusione del batterio Legionella.

3.5) Bibliografia

- [1] <https://www.epa.gov/iaq-schools/moisture-control-part-indoor-air-quality-design-tools-schools>
- [2] U.S. Environmental Protection Agency, *Moisture Control Guidance for Building Design, Construction and Maintenance*, December 2013 (www.epa.gov/iaq/moisture).
- [3] http://avamiri.dgt.uniud.it/didattica/materiale-didattico/area-riservata/materiale-didattico-seminari-2011/s7_verri/2_Gestione%20di%20acque%20meteoriche%20in%20aree%20urbane_Bolzano.pdf/at_download/file
- [4] Ministro dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare (2017). *Decreto 11 ottobre 2017: Criteri ambientali minimi per l'affidamento di servizi di progettazione e lavori per la nuova costruzione, ristrutturazione e manutenzione di edifici pubblici*. In G.U. 6 novembre 2017, n. 259.
- [5] Corso Avanzato CasaClima
- [6] Agenzia per l'Energia Alto Adige - CasaClima, *CASA COME? CASACLIMA, Vademecum del Costruire Bene*, Edizione N° 1 - Settembre 2019.
- [7] <https://www.agenziacasaclima.it/it/certificazione-sostenibilita/casaclimaschool-1553.html>
- [8] UNI EN ISO 13788 (2013). *Prestazione igrotermica dei componenti e degli elementi per edilizia - Temperatura superficiale interna per evitare l'umidità superficiale critica e la condensazione interstiziale - Metodi di calcolo*. Ente Nazionale Italiano di Unificazione, Milano.
- [9] UNI EN ISO 10211 (2018). *Ponti termici in edilizia - Flussi termici e temperature superficiali - Calcoli dettagliati*. Ente Nazionale Italiano di Unificazione, Milano.
- [10] https://www.agenziacasaclima.it/smarteredit/documents/inhalte/_Inhalte_Downloads/_published/catalogo-katalog_v100.pdf
- [11] UNI 11470 (2015). *Coperture discontinue - Schermi e membrane traspiranti sintetiche - Definizione, campo di applicazione e posa in opera*. Ente Nazionale Italiano di Unificazione, Milano.
- [12] Ministero dello Sviluppo Economico (2015). *Decreto 26 giugno 2015: Applicazione delle metodologie di calcolo delle prestazioni energetiche e definizione delle prescrizioni e dei requisiti minimi degli edifici*. In S.O.G.U. 15 luglio 2015, n. 162.
- [13] UNI EN 15026 (2008). *Prestazione termoigrometrica dei componenti e degli elementi di edificio - Valutazione del trasferimento di umidità mediante una simulazione numerica*. Ente Nazionale Italiano di Unificazione, Milano.
- [14] Agenzia per l'Energia Alto Adige - CasaClima, *CasaClima DueGradi N°2 - Ottobre 2020*.
- [15] <https://www.agenziacasaclima.it/it/procasaclima-hygrothermal--9-1673.html>
- [16] https://www.agenziacasaclima.it/smarteredit/documents/inhalte/_Inhalte_Downloads/_published/DT_edifici%20esistenti%20&%20risanamento_2017_v1.01_it.pdf
- [17] American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, *Indoor Air Quality Guide: Best Practices for Design, Construction and Commissioning*, 2009.

[18] Stanke, D. and B. Bradley, 2002, *Managing the ins and outs of commercial buildings pressurization*, Trane Engineers Newsletter 31(2).

[19] Taylor, S.T. 2000, *Comparing economizer relief systems*, ASHRAE Journal 42(9): 33-42.

[20] UNI 10339 (1995). *Impianti aeraulici ai fini di benessere. Generalità, classificazione e requisiti. Regole per la richiesta d'offerta, l'offerta, l'ordine e la fornitura*. Ente Nazionale Italiano di Unificazione, Milano.

4) Protezione da gas radon

Il radon (^{222}Rn) è un gas nobile radioattivo prodotto dal decadimento dell'uranio contenuto quasi ovunque nel terreno, la cui presenza non può essere percepita dall'uomo in quanto incolore, inodore e insapore. A causa della differenza di pressione tra l'ambiente interno e quello esterno, esso può penetrare nelle abitazioni sfruttando la porosità del terreno e la presenza di eventuali fessurazioni negli elementi costruttivi o di giunti di connessione e canalizzazioni non perfettamente sigillati. Ne deriva che le concentrazioni maggiori di radon vengono generalmente raggiunte nei locali interrati, seminterrati e al piano terra, mentre dal primo piano in poi il livello cala drasticamente, salvo alcuni casi particolari. A seconda della concentrazione e della durata dell'esposizione, il radon può essere causa di insorgenza di cancro polmonare. Per questo motivo l'Organizzazione Mondiale della Sanità (OMS) raccomanda un livello di riferimento inferiore a 100 Bq/m^3 e comunque mai superiore a 300 Bq/m^3 [1]. Ancora, l'Agenzia statunitense per la Protezione dell'Ambiente (EPA) abbassa il livello di soglia oltre il quale intervenire a 150 Bq/m^3 , sia per le scuole che per le abitazioni [2, 3].

4.1) Aspetti generali

Dato che in Italia, così come in Svizzera, sono presenti zone ad alto rischio radon, si ritiene indispensabile adottare tutti gli accorgimenti necessari per garantire livelli di concentrazione indoor più bassi possibile, sia negli edifici esistenti che in quelli di nuova costruzione. In riferimento ai primi, è necessario intervenire con opportune azioni di risanamento a seconda degli output delle misure e quindi dell'entità del problema riscontrato; per i secondi, invece, si consiglia un'accurata valutazione preventiva della concentrazione potenziale di radon negli ambienti interni, da effettuarsi in parte mediante l'analisi delle mappe di rischio radon e in parte attraverso un'analisi geomorfologica del sito. Quest'ultima, infatti, permette di studiare, a livello locale, la composizione del suolo, la granulometria della roccia e la permeabilità del terreno, ovvero di individuare quei fattori che possono concorrere ad una maggiore concentrazione di gas radon negli edifici. In particolare, va prestata attenzione quando lo scavo di costruzione interessa fasce detritiche e zone franose, nonché terreni molto fratturati o eterogenei, contrariamente invece a quelli compatti e argillosi (ammesso che lo strato non venga perforato). In presenza di tali fattori di rischio, gli interventi da attuare potrebbero essere ben più significativi rispetto a quelli dettati dalla sola lettura delle mappe.

È altresì corretto evidenziare le differenze che intercorrono tra il risanamento del problema radon in una costruzione esistente e la prevenzione dal rischio radon in un edificio nuovo, ancora in fase di progetto. Sebbene entrambe le situazioni condividano lo stesso obiettivo, ossia quello di impedire o di minimizzare l'ingresso del gas, dal punto di vista operativo le differenze sono sostanziali: nel caso di un risanamento, le contromisure devono adattarsi ad una struttura esistente, con possibili punti d'infiltrazione nascosti e con risultati non sempre soddisfacenti. Viceversa, le azioni preventive, essendo pianificate in base alle reali esigenze e integrate perfettamente alla nuova struttura, sono più semplici da realizzare e danno maggiori garanzie di successo.

Ne consegue che alcuni provvedimenti siano più adatti alle nuove costruzioni, mentre altri siano indicati soprattutto per il risanamento radon in edifici esistenti. Tali provvedimenti, raccolti in Tabella 4.1 e 4.2 possono essere discretizzati in funzione della classe di rischio e della destinazione d'uso dei locali. Si

sottolinea come questa classificazione, desunta dal protocollo CasaClima School [4], sia vincolante per l'ottenimento della relativa certificazione. Altrove, può rappresentare uno strumento di supporto per progettisti e addetti ai lavori al fine di individuare le soluzioni più efficaci a seconda del caso studio considerato.

Tabella 4.1. Discretizzazione degli interventi a seconda della classe di rischio e delle caratteristiche dei locali [4]

	Interventi di base	Interventi semplici	Interventi significativi
Classe di rischio radon più bassa (200-300 Bq/m ³) + locali non abitati nell'interrato a contatto con il terreno	x		
Classe di rischio radon più bassa (200-300 Bq/m ³) + locali abitati a contatto con il terreno	x	x	
Classe di rischio radon elevata (>300 Bq/m ³) + locali non abitati nell'interrato a contatto con il terreno	x	x	
Classe di rischio radon elevata (>300 Bq/m ³) + locali abitati a contatto con il terreno	x	x	x

Tabella 4.2. Descrizione degli interventi contro il problema radon [4]

Interventi di base:	
	Strato di impermeabilizzazione contro acqua e umidità di risalita continuo
	Sigillatura delle tubature che attraversano gli elementi costruttivi contro terreno
	Sigillatura delle aperture nella platea di fondazione nei confronti del passaggio di gas
Interventi semplici:	
Classe di rischio radon più bassa (200-300 Bq/m³) + locali abitati a contatto con il terreno	
	Porta a chiusura automatica e a tenuta all'aria fra cantina e spazi abitativi
	Sigillatura dei fori per il passaggio delle tubazioni attraverso il primo solaio (solaio sopra cantina)
	Sigillatura dei canali per le installazioni o del pozzo dell'ascensore o di eventuali montacarichi
	Sigillatura delle cantine con pavimentazioni a base di materiali naturali verso l'interno e accessibili solo dall'esterno
	Sigillatura delle canalizzazioni che attraversano gli elementi strutturali contro terreno
Interventi semplici:	
Classe di rischio radon elevata (≥ 300 Bq/m³) + locali non abitati nell'interrato a contatto con il terreno	
	Strato di impermeabilizzazione contro acqua e umidità di risalita continuo
	Platea e muri contro terreno da realizzare calcestruzzo con classe di esposizione XC2 o maggiore; in alternativa installare un sistema di aspirazione sotto platea
Interventi significativi:	
Classe di rischio radon elevata (≥ 300 Bq/m³) + locali abitati a contatto con il terreno	
	Pozzetto radon o drenaggio radon
	Involucro a tenuta all'aria ($n_{50} \leq 0,6 \text{ h}^{-1}$) con sistema di ventilazione meccanica

Per gli edifici scolastici di nuova costruzione si consiglia in ogni caso di prevedere sempre, come misura preventiva, un vespaio con inseriti tubi di drenaggio anche in zone definite a basso rischio radon. Inoltre, ad edificio concluso, si raccomanda di effettuare una misura della concentrazione interna di radon con dosimetri passivi in fase di utilizzo dello stesso [4].

Si sottolinea come molte delle tecniche di prevenzione e di mitigazione del radon si riflettano positivamente anche sulle altre problematiche di qualità dell'aria interna: ad esempio, la sigillatura di tutte le vie d'ingresso, come fessure, crepe e canali, comporta un miglioramento della tenuta all'aria dell'involucro, limitando i fenomeni di condensazione interstiziale e di risalita capillare dal terreno. Ancora, l'esercizio della ventilazione e la pressurizzazione dei locali occupati creano i presupposti per una buona areazione e per un'efficiente diluizione degli inquinanti interni. Da qui l'importanza di implementare le soluzioni più significative sia nel nuovo che nell'esistente, anche a prescindere dalla classe di rischio radon.

Oltre al terreno, esistono anche altre sorgenti di emissione di gas radon negli ambienti interni. Una di queste è rappresentata dai materiali da costruzione che, sebbene siano delle sorgenti di secondaria importanza rispetto al suolo, contribuiscono in maniera più o meno importante alla concentrazione di radon indoor. Pertanto, si raccomanda di moderare l'impiego di materiali di origine vulcanica particolarmente ricchi di uranio, come i tufi, il porfido e il granito [5]. Si rimanda alla Tabella 4.3 per ulteriori approfondimenti.

Tabella 4.3. *Contenuto di elementi radioattivi in diversi materiali da costruzione [5]*

Materiale	Tipo	Prov.	Ra-226 [Bq/kg]	Th-232 [Bq/kg]	K-40 [Bq/kg]
Monte Bianco	Gneiss	Ao	166	86	832
Pietra di Luserna	Gneiss	Cn	125	114	1276
Rosa Baveno	Granito	No	65	63	1100
Sienite della Balma	Sienite	Vc	375	339	1390
Granito Bianco	Sienite	Vc	269	173	1181
Ardesia	Ardesia	Ge	46	47	924
Tonalite	Gneiss	So	30	26	498
Porfido di Albiano	Porfido	Tn	51	71	1476
Nuvolera	Marmo	Bs	2	< 0,3	< 3
Bianco Carrara	Marmo	Ms	3,9	< 0,3	4,2
Paperino Grigio	Paperino	Vt	121	160	1340
Basaltina	Basalto	Vt	498	712	2354
Travertino	Travertino	Rm	0,5	< 0,2	< 2

Tutte le misure di prevenzione e di mitigazione del radon fin qui introdotte verranno analizzate in dettaglio nei paragrafi successivi e declinate in modo opportuno alle nuove costruzioni e agli edifici esistenti.

4.2) Cosa dice la legge

Gli interventi da effettuare sia nelle nuove costruzioni che negli edifici esistenti andrebbero tarati, rispettivamente, in funzione degli output della valutazione preventiva e delle misure condotte nei locali occupati: in particolare, si consiglia di intraprendere opportuni provvedimenti se la concentrazione media annua stimata di radon supera i 200 Bq/m^3 , provvedimenti che saranno tanto più importanti quanto maggiore è la classe di rischio del sito [4]. L'obiettivo, infatti, deve essere quello di contenere il livello di riferimento al di sotto di 300 Bq/m^3 , in conformità alla Direttiva 2013/59/EURATOM, che stabilisce le norme fondamentali di sicurezza relative alla protezione contro i pericoli derivanti dall'esposizione alle radiazioni ionizzanti sui luoghi di lavoro, comprese le scuole [6].

L'Italia ha recepito tali disposizioni attraverso il Decreto Legislativo 31 luglio 2020, n. 101. Basandosi sul principio di ottimizzazione vengono applicati dei livelli massimi di riferimento di 200 Bq/m^3 e 300 Bq/m^3 . Il decreto prevede l'adozione del Piano nazionale d'azione per il radon, concernente i rischi di lungo termine dovuti all'esposizione al radon nelle abitazioni, negli edifici pubblici e nei luoghi di lavoro [7]. Esso, in particolare, dovrà individuare strategie, norme e modalità d'intervento per prevenire e ridurre il problema radon sia nelle nuove costruzioni che nelle opere di ristrutturazione di edifici esistenti. Inoltre, viene introdotto il concetto di aree prioritarie di intervento, nelle quali la stima della percentuale di edifici che supera il livello di 300 Bq/m^3 è pari o superiore al 15%.

Per ulteriori disposizioni relative ai luoghi di lavoro e agli edifici pubblici, si rimanda al D.L. 101/2020 e ai Criteri Ambientali Minimi emanati con il Decreto Ministeriale 11 ottobre 2017 [8].

4.3) Nuove costruzioni

Il provvedimento più semplice ma allo stesso tempo più importante da osservare in fase di costruzione consiste nella sigillatura di tutte le "vie di comunicazione" tra involucro riscaldato e terreno. Si invita pertanto a minimizzare il numero di perforazioni delle fondamenta, a cui devono essere preferite le aperture laterali, da trattare con materiali isolanti e flange elastiche. Questo vale per canali e pozzetti di ispezione, condotte idrauliche ed elettriche, così come per sonde e scambiatori geotermici che, data la loro natura, rappresentano una potenziale via di accesso del radon. In Figura 4.1 viene mostrato il corretto utilizzo di un manicotto in gomma per la sigillatura di uno scarico d'acqua che attraversa la platea di fondazione.

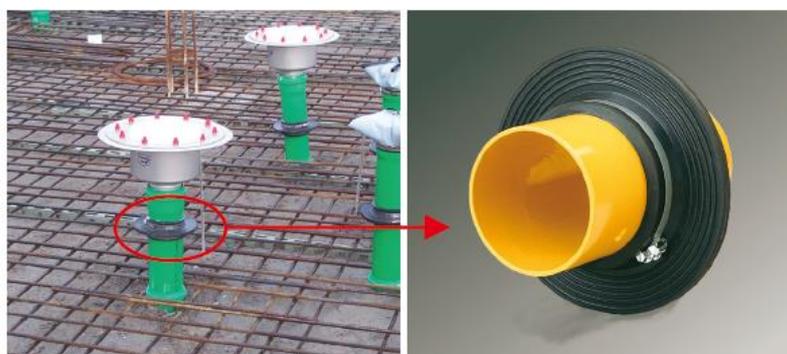


Figura 4.1. Esempio di uno scarico d'acqua attraverso una platea di fondazione, con dettaglio del manicotto [9]

Anche la sigillatura di tutte le vie di comunicazione tra gli ambienti controterra non occupati e quelli riscaldati riveste un ruolo chiave per il controllo del radon. Ad esempio, in presenza di una cantina, tutti i fori di passaggio delle condotte attraverso il soffitto della stessa devono essere sigillati a regola d'arte e la separazione con il resto dell'edificio deve avvenire mediante una porta a tenuta all'aria. A tal proposito, si preferiscano degli accessi esterni e separati alle cantine, soprattutto nel caso di una pavimentazione naturale. Anche i vani scala, i vani ascensore, i condotti verticali e i camini devono essere progettati attentamente, evitando che si crei un contatto diretto tra aree abitate e scantinati. Si ponga poi attenzione alla posa del cappotto esterno per la coibentazione delle strutture controterra: se il rivestimento isolante "penetra" nel terreno, il radon può diffondersi fino ai piani alti dell'edificio attraverso gli spazi che potrebbero rimanere vuoti tra materiale e supporto. È dunque importante sigillare completamente lo strato isolante o interromperlo per un breve tratto per permettere al radon di uscire verso l'esterno [10].

In casi specifici, si raccomandano ulteriori provvedimenti:

- gli scambiatori geotermici ad aria devono essere realizzati con tubi di plastica ermetici con giunti stagni. Un'alternativa all'esecuzione ermetica potrebbe essere rappresentata dalla messa in sovrappressione dei condotti interrati;
- nei pozzi luce il riempimento di ghiaia dev'essere delimitato ai lati e in basso da uno strato impermeabile.

Per quanto riguarda le fondamenta, in zone a rischio radon elevato si consiglia di realizzare una fondazione a soletta piena in calcestruzzo (fondazione a platea) appartenente alla classe di esposizione XC2 o superiore, che ricopra tutta l'area orizzontale dello scavo. Lo stesso materiale può essere utilizzato anche per le pareti interrate o seminterrate, da proteggere con una membrana impermeabilizzante continua verso l'esterno, prestando massima attenzione alla congiunzione tra muro e platea.

Al di sotto della fondazione a platea, o nel caso di fondazione a strisce, sotto il massetto in calcestruzzo del pavimento, si raccomanda la posa di un sistema di drenaggio, rappresentato schematicamente in Figura 4.2.



Figura 4.2. Sistema di drenaggio realizzato in un edificio con fondazioni a strisce [11]

L'esempio più comune di sistema di drenaggio è rappresentato da un vespaio areato o da un sistema con tubi di drenaggio collocati in uno strato di ghiaia, previa verifica della corretta sigillatura di tutto il solaio. La ghiaia, in particolare, andrebbe posata direttamente sul terreno compattato nel caso in cui questo sia poco o mediamente permeabile; viceversa, con un terreno molto permeabile, conviene sistemare la ghiaia sopra uno strato di cemento magro, il quale, fungendo da isolante verso il terreno, favorisce la depressione e facilita l'aspirazione dell'aria ricca di radon. Nell'utilizzo di ghiaia o ghiaietta, i tubi di drenaggio, del diametro di 10 cm, andrebbero posati a serpentina con una distanza tra i tubi fino a 8 m e collegati ad un tubo di aspirazione [9]. Viceversa, quando il sistema di drenaggio è inserito direttamente nel terreno (protezione dei tubi con ghiaia e/o stuoia geotessile) è indispensabile una distanza tra i tubi inferiore, da 1 a 3 m, garantendo allo stesso tempo una distanza minima dai muri esterni di 1-2 m. L'aspirazione dal sottosuolo e la successiva espulsione all'esterno può avvenire per effetto camino (depressione passiva) mediante un tubo collettore con diametro di almeno 15 cm in grado di scaricare il gas lateralmente attraverso la parete o al di sopra del tetto, oppure tramite un sistema formato da un ventilatore collegato ad un tubo collettore con diametro di almeno 10 cm (depressione attiva). Si verifichi che l'apertura d'uscita dell'estrattore sia collocata a non meno di 2 metri di distanza da qualsiasi porta o finestra. Infine, è importante che i tubi vengano sistemati in leggera pendenza, affinché l'acqua di condensa formatasi in inverno possa defluire nel terreno senza ostruire la fuoriuscita del gas. A tale scopo, l'*American Society for Testing and Materials International* consiglia un'inclinazione pari a 31 mm/m [12].

Per quanto concerne la scelta e l'installazione di ventilatori dedicati all'estrazione del radon nei sistemi di drenaggio, è importante il rispetto dei seguenti criteri [14]:

- l'utilizzo di macchine indicate per l'installazione esterna e destinate esclusivamente al controllo del radon, con un funzionamento continuo o intermittente. Le tipologie più utilizzate corrispondono ai ventilatori tubolari centrifughi;
- per aree da depressurizzare comprese tra 4650 e 9300 m², l'EPA raccomanda delle macchine in grado di elaborare portate di estrazione comprese tra 236 e 283 L/s alla pressione atmosferica. Ciò nonostante, per edifici commerciali e scolastici si suggeriscono delle portate di estrazione leggermente superiori a quelle indicate;
- l'impiego di un sensore in grado di percepire qualsiasi malfunzionamento del sistema di estrazione del radon e di segnalarlo agli operatori in modo opportuno. L'accensione dello stesso dovrebbe avvenire ogni qualvolta la pressione scenda al di sotto della pressione di aspirazione nominale.

Un'ulteriore misura al fine di minimizzare la concentrazione di radon indoor è di prevedere un impianto di ventilazione meccanica controllata in grado di garantire un'adeguata areazione per tutto il periodo di utilizzo dei locali riscaldati. Oltre a questo, è importante che gli ambienti siano sempre in leggera sovrappressione in modo da "schermare" l'edificio dal possibile ingresso di radon. In aree a rischio elevato, è opportuno che il sistema di ventilazione lavori assieme ad un sistema di depressurizzazione del suolo, il quale può dunque sopperire ad un malfunzionamento della VMC o ad un suo spegnimento nei periodi di non occupazione.

4.4) Il risanamento del radon in edifici esistenti

Gli interventi di risanamento del problema radon in edifici esistenti ricalcano sotto molti aspetti le misure preventive analizzate in precedenza per le nuove costruzioni. Le differenze più evidenti consistono nelle modalità di esecuzione e come già osservato nella minor efficacia dei primi rispetto alle seconde. La scelta del metodo da adottare è quasi sempre un compromesso tra la complessità di realizzazione, eventuali vincoli architettonici, il costo e il beneficio stimato. Spesso si inizia con i metodi ritenuti più semplici e meno invasivi, come la sigillatura di tutte le vie d'ingresso del radon e la maggiore areazione dei locali non riscaldati a contatto con il terreno. Dopodiché, in caso d'insuccesso, si ricorre a tecniche più risolutive tarate in funzione del rischio radon rilevato, come la realizzazione di un pozzetto radon o l'aspirazione dall'intercapedine del pavimento. Si intuisce pertanto la necessità di effettuare delle misurazioni per verificare volta per volta l'efficacia delle soluzioni implementate.

Come già accennato, l'intervento più significativo per il risanamento del problema radon negli edifici esistenti, è rappresentato dalla realizzazione di un pozzetto in grado di prelevare il gas dal sottosuolo per poi espellerlo all'esterno, come rappresentato in Figura 4.3.



Figura 4.3. Scavo di un pozzetto radon [13]

Il pozzetto (circa 0.5×0.5×1.5 m) viene scavato nel terreno sottostante l'edificio, dal quale, per mezzo di un tubo di evacuazione, si estrae l'aria ricca di radon dal sottosuolo. Il tubo può essere condotto lateralmente attraverso la parete esterna o attraverso il tetto, ad esempio sfruttando un vano per gli impianti o una canna fumaria in disuso. Per una maggiore efficienza si consiglia di posizionare il pozzetto in un punto centrale dell'edificio; in casi più complessi, come costruzioni molto grandi o distribuite su pendii, possono essere necessari più pozzetti posti in diversi punti e collegati tra loro mediante un tubo collettore. L'estrazione del radon può avvenire grazie alla depressione promossa dall'effetto camino, oppure avvalendosi di un ventilatore dedicato. Quest'ultima soluzione è particolarmente indicata per grandi edifici, come appunto le scuole. Infatti, utilizzando un ventilatore con una taglia adeguata, è possibile ridurre il numero di tubi che altrimenti si renderebbero necessari per garantire la depressurizzazione passiva del suolo. Un ulteriore beneficio consiste nella capacità, da parte della macchina, di imporre pressioni via via più basse a seconda della destinazione d'uso dei locali: ad esempio,

il suolo andrebbe mantenuto ad una pressione “più negativa” di quella che insiste in laboratori, bagni o spogliatoi controterra, a loro volta in depressione rispetto agli altri locali e/o all’ambiente esterno. A tale proposito, si consiglia di garantire una differenza di pressione tra gli ambienti al piano terra e il sottosuolo non inferiore a 5 Pa.

Il pozzetto radon non è indicato nel caso di terreni molto permeabili o con crepe, in presenza di acqua nel sottosuolo e nel caso di edifici storici. Vi sono comunque degli accorgimenti che permettono di ridurre fortemente la permeabilità del terreno, come l’aggiunta di uno strato di cemento magro sotto il sistema di drenaggio del radon. Inoltre, va prestata attenzione all’eventuale presenza di sistemi di riscaldamento a fiamma aperta, come stufe a legna e caminetti, che non dispongono di una presa separata per l’aria esterna: infatti, se i locali in cui si trovano tali sistemi sono adiacenti al pozzetto, in presenza di crepe nella pavimentazione potrebbe crearsi una leggera depressione all’interno dei locali stessi e ciò, in concomitanza con una scarsa ventilazione, potrebbe dar luogo a pericolose emissioni di monossido di carbonio dai processi di combustione.

Ancora, negli edifici esistenti si raccomanda l’esecuzione dei seguenti interventi di mitigazione [13]:

- incremento della tenuta all’aria dei componenti controterra e sigillatura di tutte le vie d’ingresso dal terreno;
- installazione di elementi divisorii (ad esempio porte e pareti a tenuta all’aria) per eliminare collegamenti diretti tra locali riscaldati e locali controterra; in alternativa, è possibile isolare gli accessi a tali ambienti mediante opportuni accorgimenti, come nell’esempio di Figura 4.4;



Figura 4.4. *Isolamento con rivestimento ermetico della scala d’accesso alla cantina [13]*

- aumento dell’areazione nei locali non riscaldati a contatto con il terreno, tramite metodi passivi (finestre socchiuse e prese d’aria esterne) o attivi (ventilatore);
- installazione di tubi di drenaggio, nel caso di rinnovo del solaio controterra, da posare su un letto di ghiaia sotto il calcestruzzo grezzo, come mostrato in Figura 4.5;



Figura 4.5. *Installazione di un sistema di drenaggio radon con rifacimento della sottostruttura del pavimento [13]*

- utilizzo di sistemi di ventilazione, centralizzati e non, che mantengano i locali riscaldati in leggera sovrappressione, dell'ordine di 1-2 Pa. A tal fine, negli impianti con recupero di calore, è necessario che l'immissione e l'asporto dell'aria siano regolati separatamente, tenendo presente che il rendimento dello scambiatore può diminuire fortemente all'aumentare della portata di aria immessa. In alternativa, è possibile porre in depressione i soli locali non occupati a contatto con il terreno, al fine di richiamare in tali ambienti aria carica di radon, da espellere poi verso l'esterno in modo opportuno. Per poter applicare questa seconda opzione è richiesta una perfetta ermeticità dei locali stessi rispetto alla zona abitativa.

Oltre a queste soluzioni, in parte già esplorate per le nuove costruzioni, è possibile mettere in pratica un ulteriore intervento, che consiste nella realizzazione di un nuovo pavimento sopra a quello esistente, mantenendo tra gli stessi un'intercapedine intermedia ventilata di circa 1 cm di altezza (Figura 4.6). Qui l'aria carica di radon viene raccolta e convogliata verso un punto di aspirazione, rappresentato da un piccolo ventilatore oppure da un tubo che conduce fino al tetto, a seconda che la depressurizzazione dell'intercapedine sia attiva o passiva. In quest'ultimo caso può essere anche conveniente realizzare l'intercapedine con dei punti d'ingresso per l'aria esterna, in modo tale da incentivare il ricambio naturale dell'aria presente nell'intercapedine. È però importante isolare termicamente la pavimentazione per evitare la formazione di condensa nei mesi freddi.

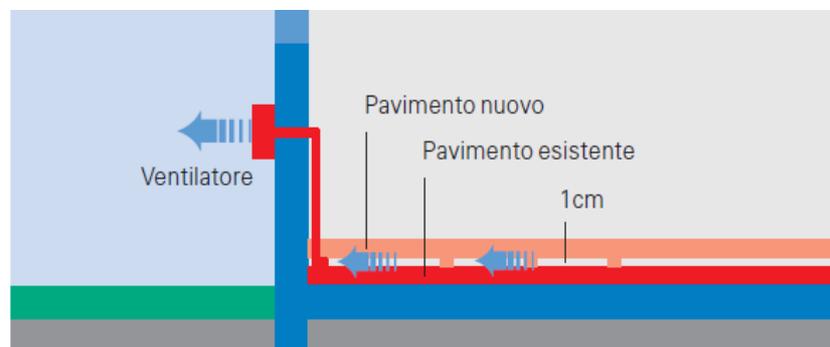


Figura 4.6. *Aspirazione dall'intercapedine di un pavimento esistente [13]*

L'aspirazione, nel caso in cui non si voglia intervenire con un'intercapedine ventilata, può avvenire anche attraverso apposite canaline di raccolta, da applicare alla linea di congiunzione tra le pareti ed il pavimento del vano controterra, come mostrato in Figura 4.7.

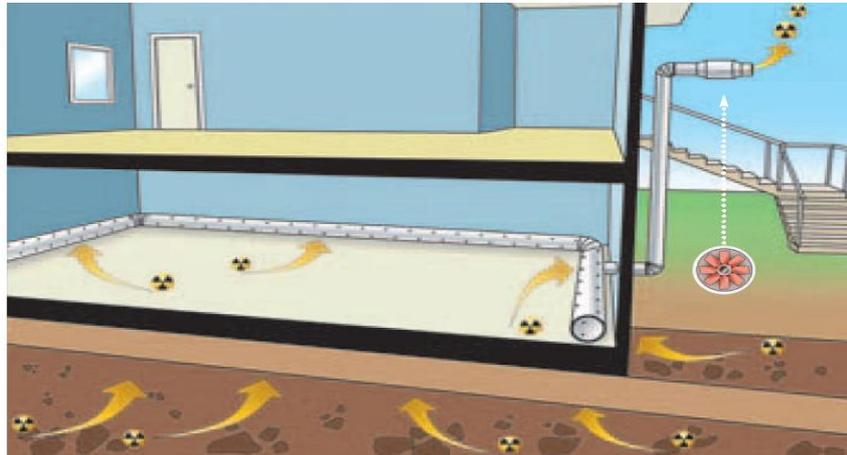


Figura 4.7. Aspirazione del radon mediante canaline di raccolta [11]

4.5) Cenni alle procedure di misura del radon

È già stato più volte evidenziato come la misurazione della concentrazione di radon negli ambienti interni consenta, da un lato, di individuare le soluzioni migliori per prevenire l'ingresso del gas nelle nuove costruzioni e dall'altro, di verificare l'efficacia dei provvedimenti di mitigazione implementati negli edifici esistenti. Tali operazioni possono essere eseguite con dosimetri passivi o servendosi di un sistema "attivo" di monitoraggio e di avviso automatico della concentrazione interna di gas radon, in conformità ai CAM edilizia [8].

Sebbene le procedure di misura degli inquinanti indoor siano trattate approfonditamente nel già citato *Protocollo di misura* sviluppato nell'ambito del progetto QAES [15], si ritiene opportuno fornire alcune indicazioni di massima, non tanto sulle tecniche e sugli strumenti da utilizzare, quanto piuttosto sulla necessità o meno di eseguire misure di radon.

È ben noto, infatti, come il valore medio annuo della concentrazione di radon presente in un edificio dipenda dal tipo di costruzione e dalle abitudini degli utenti e possa variare in modo sostanziale anche tra immobili vicini. Pertanto, si consiglia di procedere con delle misurazioni soprattutto in edifici caratterizzati da locali occupati a contatto con il terreno o situati in aree ad elevato rischio radon. Queste misurazioni possono essere condotte in funzione di quattro obiettivi principali [16]:

- a) per il confronto con i valori legali: bisogna attenersi a quanto previsto dal Decreto Legislativo 101/2020, secondo cui i livelli massimi di riferimento sono espressi in termini di valore medio annuo della concentrazione di attività di radon in aria;
- b) per la progettazione e la verifica del risanamento: è opportuno che gli interventi di risanamento del radon vengano tarati in funzione della variazione nel tempo della concentrazione del gas. A

tal fine possono essere utilizzati dispositivi elettronici per misure in continuo che permettono di identificare con più precisione i punti d'infiltrazione e le vie di propagazione del radon; questi strumenti, inoltre, consentono l'immediata verifica dell'efficacia delle azioni di risanamento. Dopodiché, una volta terminati i lavori, possono essere effettuate ulteriori misure a lungo termine per il confronto con i valori legali;

- c) per stimare l'eventuale inquinamento da radon in un edificio: si consiglia una misura in continuo da eseguire secondo determinati criteri. Ad esempio, è possibile fare dei test di alcuni giorni in diversi locali a contatto con il terreno, accertandosi che le porte interne siano chiuse e che il ricambio d'aria sia minimo (finestre preferibilmente chiuse);
- d) per l'individuazione delle aree a rischio e per la costruzione delle mappe radon: a tale proposito, si sottolinea come i valori medi riportati sulle mappe non costituiscano una stima della concentrazione di radon in un determinato edificio, ma fungono solamente da strumento informativo per il settore edilizio, in quanto indicano dove è più probabile avere elevati livelli di radon nelle abitazioni.

Oltre a queste indicazioni generali, l'EPA ha definito delle specifiche raccomandazioni per le scuole [17]:

- negli edifici di nuova costruzione equipaggiati con sistemi di depressurizzazione attiva del suolo, le misure andrebbero effettuate almeno 24 ore dopo l'accensione del ventilatore per verificare che i livelli di radon siano inferiori a 150 Bq/m^3 [18];
- è opportuno che qualsiasi scuola esistente venga sottoposta ad un processo di misura [2];
- le misure andrebbero effettuate in tutti i locali occupati a contatto con il terreno, preferibilmente nei mesi più freddi con porte e finestre chiuse, ad eccezione degli ingressi e delle uscite principali. I test possono essere a breve termine (da 2 a 90 giorni) o a lungo termine (più di 90 giorni) [19];
- le misure non dovrebbero essere condotte durante modifiche strutturali o con funzionamenti anomali del sistema HVAC [19];
- le misure andrebbero effettuate a valle di qualsiasi intervento di mitigazione, così come dopo importanti lavori di ristrutturazione all'involucro o a seguito di modifiche all'impianto HVAC.

4.6) Gestione e manutenzione dei sistemi di mitigazione del radon

Analogamente agli impianti HVAC, anche il sistema di controllo del radon necessita di una manutenzione periodica che può essere eseguita secondo queste scadenze [14]:

- ogni settimana: controllare i manometri dei tubi di sfiato del radon per assicurarsi che venga mantenuta una pressione negativa adeguata a depressurizzare l'area coinvolta dall'intervento;
- annualmente: ispezionare i ventilatori di aspirazione del radon per rilevarne l'usura o eventuali guasti ai cuscinetti o altri funzionamenti anomali, procedendo ove necessario con la riparazione o la sostituzione degli stessi; verificare che la posizione del tubo di scarico del radon non si trovi in prossimità di nessuna presa d'aria e/o finestra; controllare il sistema HVAC per constatare il

corretto bilanciamento delle portate, cosicché il suo funzionamento non dia luogo a pressioni inferiori rispetto a quelle che insistono nella sottostruttura depressurizzata; verificare l'eventuale presenza di crepe nel solaio, nel pavimento o nel seminterrato ed eseguire, qualora si ritenga opportuno, misure della concentrazione di radon. Nel caso in cui vengano riscontrati dei valori allarmanti, si proceda con sigillature aggiuntive, controllando soprattutto l'integrità della membrana impermeabile nel vespaio;

- ogni qualvolta si eseguano lavori alle fondamenta: assicurare la sigillatura di tutte le vie d'ingresso del radon dal sottosuolo.
- ogni qualvolta si eseguano lavori sull'impianto di ventilazione: verificare che i criteri di bilanciamento, pressurizzazione e areazione dei locali rimangano quelli di progetto.

4.7) Bibliografia

- [1] World Health Organization, *WHO handbook on indoor radon: a public health perspective*, 2009.
- [2] U.S. Environmental Protection Agency, EPA 2009, *IAQ Tools for Schools Action Kit. IAQ Reference Guide, Appendix G: Radon*, Washington.
- [3] U.S. Environmental Protection Agency, EPA 2009, *A citizens' guide to radon: The guide to protecting yourself and your family from radon*, Washington.
- [4] <https://www.agenziacasaclima.it/it/certificazione-sostenibilita/casaclimaschool-1553.html>.
- [5] U. Facchini, G. Valli, R. Vecchi, *Il Radon nella Casa*, Ist. di Fisica Gen. Applicata, Università di Milano, maggio 1991.
- [6] Consiglio dell'Unione Europea (2013), *Direttiva 2013/59/Euratom del Consiglio del 5 dicembre 2013 che stabilisce norme fondamentali di sicurezza relative alla protezione contro i pericoli derivanti dall'esposizione alle radiazioni ionizzanti, e che abroga le direttive 89/618/Euratom, 90/641/Euratom, 96/29/Euratom, 97/43/Euratom e 2003/122/Euratom*. In Gazzetta ufficiale dell'Unione europea del 17 gennaio 2014.
- [7] Presidente della Repubblica (2020), *Decreto Legislativo 31 luglio 2020, n. 101: Attuazione della direttiva 2013/59/Euratom, che stabilisce norme fondamentali di sicurezza relative alla protezione contro i pericoli derivanti dall'esposizione alle radiazioni ionizzanti, e che abroga le direttive 89/618/Euratom, 90/641/Euratom, 96/29/Euratom, 97/43/Euratom e 2003/122/Euratom e riordino della normativa di settore in attuazione dell'articolo 20, comma 1, lettera a), della legge 4 ottobre 2019, n. 117*. In S.O. alla G.U. 12 agosto 2020, n. 201.
- [8] Ministro dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare (2017), *Decreto 11 ottobre 2017: Criteri ambientali minimi per l'affidamento di servizi di progettazione e lavori per la nuova costruzione, ristrutturazione e manutenzione di edifici pubblici*. In G.U. 6 novembre 2017, n. 259.
- [9] Confederazione Svizzera, Ufficio federale della sanità pubblica (UFSP), *Radon: Misure di prevenzione negli edifici nuovi*, 2012.
- [10] Agenzia provinciale per l'ambiente di Bolzano, *Radon: le contromisure*, Sito: Radiazioni/Radon/Le contromisure.
- [11] Istituto Superiore per la Prevenzione E la Sicurezza del Lavoro, Osservatorio Nazionale Epidemiologico sulle condizioni di Salute e Sicurezza negli Ambienti di Vita, Gruppo di lavoro: "Ambienti di vita: prevenzione del rischio radon negli ambienti domestici", *Il radon in Italia: guida per il cittadino*, novembre 2007.
- [12] American Society for Testing and Materials International, ASTM 2007, *Standard Practice for Radon Control Options for the Design and Construction of New Low-Rise Residential Buildings*. West Conshohocken.

[13] Confederazione Svizzera, Ufficio federale della sanità pubblica (UFSP), *Radon: Misure di risanamento negli edifici esistenti*, 2012.

[14] American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, *Indoor Air Quality Guide: Best Practices for Design, Construction and Commissioning*, 2009.

[15] https://www.qaes.it/wp-content/uploads/2020/05/QAES_T4.1_Protocollo_FINALE.pdf

[16] Confederazione Svizzera, Ufficio federale della sanità pubblica (UFSP), *Radon: Misurazione e valutazione*, 2012.

[17] U.S. Environmental Protection Agency, EPA 1994, *Radon Prevention in the Design and Construction of Schools and Other Large Buildings*, third printing with addendum, Washington.

[18] U.S. Environmental Protection Agency, EPA 2009, *Granite countertops and radiation. Radiation Protection*, Washington.

[19] U.S. Environmental Protection Agency, EPA 2003, *EPA Assessment of Risks from Radon in Homes*, Washington.