

ALMA MATER STUDIORUM - UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

SCUOLA DI INGEGNERIA E ARCHITETTURA

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE (DIN)

CORSO DI LAUREA in INGEGNERIA EDILE - ARCHITETTURA

TESI DI LAUREA

in

IMPIANTI TECNICI

**LA VENTILAZIONE IN AMBITO RESIDENZIALE:
ASPETTI TECNICO-NORMATIVI ED APPLICAZIONE
AD UN CASO DI STUDIO**

CANDIDATO
Di Camillo Federico

RELATORE:
Prof. Ing. Semprini Giovanni

CORRELATORE:
Prof. Arch. Annarita Ferrante

Anno Accademico 2012/13
Sessione II

a mio nonno

INDICE

INDICE	I
INTRODUZIONE	1
1 QUALITA' DELL'ARIA	3
1.1 Inquinanti chimici	4
1.1.1 Monossido di carbonio (CO)	4
1.1.2 Biossido di carbonio (CO ₂).....	7
1.1.3 Ossidi di azoto (NO _x).....	9
1.1.4 Ossidi di zolfo (SO _x).....	12
1.1.5 Ozono (O ₃).....	15
1.1.6 Benzene (C ₆ H ₆).....	17
1.1.7 Formaldeide	20
1.1.8 ETS (<i>Enviromental Tobacco Smoke</i>).....	22
1.1.9 Particolato aerodisperso	24
1.2 Inquinanti fisici	27
1.2.1 Radon	27
1.2.2 Amianto.....	28
1.3 Inquinanti biologici	30
1.3.1 Bioeffluenti	30
1.3.2 Muffe.....	30
1.3.3 Batteri e virus	30
1.3.4 Allergeni	31
1.4 Qualità dell'aria esterna	32
1.5 Qualità dell'aria interna	36
1.6 Effetti sulla salute	39
2 CONTESTO LEGISLATIVO E NORMATIVO DELLA VENTILAZIONE	41
2.1 La legislazione comunitaria	41
2.2 La legislazione in Italia	42
2.2.1 Il D.Lgs. 192/2005 e s.m.i.....	42
2.2.2 I Regolamenti comunali	43

2.3	Normativa tecnica	47
2.3.1	Normative di supporto alla EPBD	47
2.3.1.1	UNI EN 15251:2008	47
2.3.1.2	UNI EN 15239:2008 e UNI EN 15240:2008.....	50
2.3.1.3	UNI EN 15242:2008	50
2.3.1.4	UNI EN 15243:2008	52
2.3.1.5	UNI EN 13779:2008	52
2.3.2	Normative generali per la determinazione di portate d'aria	55
2.3.2.1	UNI 10339	55
2.3.2.2	ANSI/ASHRAE STANDARD 62.1:2010	58
2.3.2.3	ANSI/ASHRAE STANDARD 62.2:2010	61
2.3.3	Muffe e condense	64
2.3.3.1	UNI EN ISO 13788:2003.....	66
2.3.3.2	CEN TR 14788:2006	74
2.3.4	Ventilazione e risparmio energetico	88
2.3.4.1	UNI EN 12831	88
2.3.4.2	UNI EN ISO 13790:2008.....	93
2.3.4.3	UNI TS 11300-1:2008	96
2.3.5	Ventilazione e sicurezza degli impianti: la norma UNI 7129-2:2008	100
2.3.5.1	Tipologie di apparecchi.....	101
2.3.5.2	Tipologie di ventilazione	104
2.3.5.3	Calcolo della sezione netta totale delle aperture di ventilazione	108
2.3.6	Normativa di prodotto.....	112
2.3.6.1	UNI EN 13141-x.....	112
2.3.6.2	UNI EN 13142:2013	113
3	TECNICA E TECNOLOGIA DELLA VENTILAZIONE.....	114
3.1	Ventilazione	114
3.1.1	Definizioni	114
3.1.2	Efficienza di ventilazione	114

3.1.3	Tasso di ricambio d'aria.....	116
3.2	Tecniche di ventilazione	116
3.2.1	Aerazione	117
3.2.1.1	Ventilazione frontale.....	118
3.2.1.2	Ventilazione passante.....	121
3.2.2	Infiltrazione.....	123
3.2.2.1	Infiltrazione attraverso l'involucro	123
3.2.2.2	Infiltrazione attraverso i serramenti	126
3.2.3	Ventilazione naturale	128
3.2.3.1	Effetto del vento.....	128
3.2.3.2	Effetto camino.....	130
3.2.3.3	Strumenti di calcolo – modelli semiempirici	132
3.2.3.4	Vantaggi e limiti	135
3.2.4	Ventilazione meccanica	136
3.2.5	Ventilazione ibrida.....	137
3.3	Tecnologia della ventilazione	138
3.3.1	Sistemi di ventilazione naturale.....	138
3.3.1.1	Dispositivi di immissione controllata dell'aria	140
3.3.1.2	Rete di estrazione.....	142
3.3.2	Sistemi di ventilazione meccanica a semplice estrazione.....	143
3.3.3	Sistemi di ventilazione meccanica bilanciata	144
3.4	Componenti dei sistemi di ventilazione.....	145
3.4.1	Condotti aeraulici.....	145
3.4.2	Ventilatori	147
3.4.3	Recuperatore di calore	150
3.4.4	Altri componenti	153
3.4.4.1	Attenuatori acustici	153
3.4.4.2	Filtri.....	154
3.4.4.3	Batterie di riscaldamento o raffreddamento.....	155
3.4.4.4	Dispositivi per la variazione della portata d'aria	156

4	APPLICAZIONE AD UN CASO DI STUDIO: EDIFICIO NEL QUARTIERE PEEP DI CORTICELLA	157
4.1	Inquadramento.....	157
4.2	Calcolo delle portate di ventilazione	161
4.2.1	Appartamento 1.....	161
4.2.1.1	Calcolo delle portate d'aria secondo le varie normative.....	162
4.2.1.2	Riepilogo dei risultati.....	165
4.2.2	Appartamento 2.....	167
4.2.3	Appartamento 3.....	169
4.2.4	Appartamento 4.....	171
4.3	Calcolo delle portate d'aria per infiltrazione	174
4.4	Calcolo delle portate d'aria dovute all'aerazione	176
4.4.1	Appartamento 1.....	176
4.4.2	Appartamento 2.....	177
4.4.3	Appartamento 3.....	178
4.4.4	Appartamento 4.....	178
4.4.5	Riepilogo risultati.....	178
4.5	Calcolo delle portate d'aria per i singoli ambienti.....	179
4.6	Dimensionamento di massima dell'impianto di ventilazione.....	182
4.6.1	Rete di immissione e estrazione.....	183
4.6.2	Componenti del sistema di ventilazione	184
4.6.2.1	Ventilatori	184
4.6.2.2	Recuperatore di calore	185
4.6.2.3	Condotti aeraulici.....	187
4.7	Ipotesi di riqualificazione architettonica del sistema edificio-impianto ...	188
4.7.1	Struttura e involucro del cavedio tecnico.....	188
4.7.2	Ipotesi compositive ed impiantistiche.....	189
4.8	Valutazione dei fabbisogni energetici della ventilazione.....	205
4.8.1	Stato di fatto.....	205
4.8.1.1	Appartamento 1 piano primo	205
4.8.1.2	Appartamento 1 piano quarto.....	210
4.8.1.3	Appartamento 1 piano ottavo.....	214

4.8.2	Ipotesi di intervento n°1	219
4.8.2.1	Appartamento 1 piano primo	220
4.8.2.2	Appartamento 1 piano quarto.....	221
4.8.2.3	Appartamento 1 piano ottavo.....	222
4.8.3	Ipotesi di intervento n°2.....	223
4.8.3.1	Appartamento 1 piano primo	223
4.8.3.2	Appartamento 1 piano quarto.....	224
4.8.3.3	Appartamento 1 piano ottavo.....	225
4.8.4	Ipotesi di intervento n°3.....	226
4.8.4.1	Appartamento 1 piano primo	227
4.8.4.2	Appartamento 1 piano quarto.....	228
4.8.4.3	Appartamento 1 piano ottavo.....	229
4.9	Certificazioni energetiche.....	230
4.9.1	Calcolo di EP_i	231
4.9.2	Calcolo di EP_{acs}	231
4.9.3	Appartamento 1 piano primo	234
4.9.3.1	Stato di fatto.....	234
4.9.3.2	Stato di progetto (ipotesi di intervento n°3).....	235
4.9.4	Appartamento 1 piano quarto.....	236
4.9.4.1	Stato di fatto.....	236
4.9.4.2	Stato di progetto (ipotesi di intervento n°3).....	237
4.9.5	Appartamento 1 piano ottavo.....	238
4.9.5.1	Stato di fatto.....	238
4.9.5.2	Stato di progetto (ipotesi di intervento n°3).....	239
5	CONCLUSIONI.....	240
	Bibliografia e sitografia	245

INTRODUZIONE

Negli ultimi decenni si è assistito ad una crescente attenzione per la problematica legata all'incremento dell'inquinamento atmosferico, nei paesi più industrializzati e in quelli emergenti, in quanto costituisce una reale fonte di pericolo per la salute e il benessere dell'uomo.

Sono quindi state adottate particolari misure quali la definizione di concentrazioni massime di inquinanti consentite e l'obbligo del controllo delle emissioni.

Parallelamente ad un seppur parziale contenimento dell'inquinamento *outdoor*, si è assistito ad una crescente attenzione mondiale verso il tema della qualità dell'aria *indoor*, degli ambienti confinati.

La questione è di notevole importanza soprattutto perché nella società di oggi le persone trascorrono la maggior parte della loro vita in ambienti chiusi; diretta conseguenza di ciò è stato il raddoppiarsi negli ultimi due decenni di malattie allergiche e asmatiche. (Olesen, 2012)

Non è quindi possibile prescindere da questo problema specialmente nell'ottica di tutela della salute umana.

La qualità dell'aria interna negli ultimi anni è diminuita drasticamente a causa di diversi fattori quali: il risparmio energetico e la conseguente diminuzione della ventilazione, nuovi materiali da costruzione e nuove fonti di inquinamento *indoor*, oltre ad una presenza frequente di fumo di sigaretta (*ETS*).

Le numerose campagne di risparmio energetico, unite agli elevati prezzi dell'energia, hanno spinto molte persone a rendere il più possibile ermetiche le loro abitazioni riducendo anche il tasso di ventilazione; ciò significa che la quantità di aria esterna fornita dalle infiltrazioni attraverso l'involucro e gli infissi non è più sufficiente a fornire il necessario ricambio d'aria.

L'introduzione e l'utilizzo di nuovi materiali, come ad esempio i polimeri e le fibre, hanno contribuito all'aumento di emissioni di inquinanti andando a compromettere sempre più la qualità dell'aria interna.

Anche se ad oggi sono disponibili numerosi standard e linee guida per la valutazione del tasso di ventilazione minimo in base a vari parametri, questi sono ben lungi dall'essere esaustivi: c'è la necessità infatti di conoscere i requisiti di accettabilità dell'aria interna in base agli obiettivi di benessere, comfort e prestazioni energetiche e i tassi di emissione da tutte le fonti.

Purtroppo però esistono migliaia di sostanze emesse dalle persone, dagli arredi, e dall'ambiente esterno; se per il primo componente si dispone di dati sufficienti, per la componente "edificio" la documentazione è molto scarna. Vi è perciò la necessità di una migliore certificazione ed etichettatura dei materiali utilizzati negli edifici e di sviluppare una normativa sulla ventilazione che favorisca i produttori di materiali a "basso" inquinamento.

1 QUALITA' DELL'ARIA

L'uomo, oltre al bisogno di un regolare e costante approvvigionamento di cibo e acqua (1-2 litri al giorno), necessita di fornitura continua di aria (10-20 m³ al giorno) (WHO Europe, 2000)

L'aria che costituisce la nostra atmosfera è costituita da una miscela di gas ("aria secca") e da vapor d'acqua in misura variabile, quantità limitata dalla pressione di vapore saturo dell'acqua.

L'aria secca è composta, in volume, per circa il 78% da azoto, per il 21% da ossigeno, per l'1% da argon e in quantità molto inferiori da altri gas, tra cui il diossido di carbonio (CO₂, tra i 330 e i 360 ppm¹ \cong 0,034%).

Nell'ultimo secolo il tasso di CO₂ è notevolmente aumentato a causa in particolare dell'attività umana industriale, dai circa 280 ppm nel 1900 a 315 ppm nel 1970 (Raisa, et al., 2010) fino a circa 393 ppm nel mese di settembre 2013 (Oxygen).

La qualità dell'aria è una misura di quanto questa sia libera da inquinamento e innocua per l'essere umano.

Il Ministero dell'Ambiente, nel 1991, definì così l'inquinamento interno:

“Qualsiasi alterazione delle caratteristiche chimico fisiche e biologiche dell'aria, determinata sia da variazioni di concentrazione dei suoi normali costituenti sia e soprattutto, dalla presenza di sostanze estranee alla sua composizione normale in grado di determinare effetti di molestia e/o danno all'uomo”.

¹ L'unità di misura ppm (parti per milione), o anche ppb (parti per miliardo), indica il rapporto tra quantità omogenee e possono riferirsi al volume o alla massa. Per la conversione, valgono le seguenti relazioni:

$$ppm = 8,314(273,15 + t) / (M \cdot p) \text{ mg / m}^3$$

$$\text{mg / m}^3 = 0,1203(M \cdot p) / (273,15 + t) \text{ ppm}$$

dove:

M = massa molare del contaminante [kg / kmol]

p = pressione della miscela [kPa]

t = temperatura della miscela [°C]

Gli inquinanti possono suddividersi essenzialmente in tre categorie: *chimici* (monossido di carbonio, biossido di azoto, biossido di zolfo, benzene, ozono, particolato aerodisperso, ecc), prodotti principalmente dalle attività umane come impianti industriali o mezzi di trasporto, *biologici* (batteri, pollini, muffe, acari e gas metabolici) e *fisici* (amianto e radon).

1.1 Inquinanti chimici

1.1.1 Monossido di carbonio (CO)

Il monossido di carbonio è un gas tossico incolore, inodore, insapore e non irritante; si forma durante processi incompleti di combustione dei combustibili organici (come carbone, legno e metano) cioè quando il quantitativo di ossigeno non è sufficiente per ossidare completamente le sostanze organiche.

1.1.1.1 Effetti sulla salute

A basse dosi il CO non è pericoloso, ma già a livelli di concentrazione nel sangue (il monossido di carbonio è solubile nel plasma e nel sangue) pari al 10-20% il soggetto avverte i primi sintomi come lieve emicrania, stanchezza o vertigini (Arpa Emilia Romagna, 2013) mentre per alte concentrazioni (> 350 ppm) risulta essere fatale.

Infatti il monossido di carbonio si lega all'emoglobina presente nel sangue e forma carbossiemoglobina (COHb), composto che riduce la capacità dell'emoglobina di trasportare l'ossigeno nel sangue; essendo il cervello e i muscoli le parti dell'organismo che necessitano di più ossigeno sono le prime ad essere affette.

1.1.1.2 Sorgenti outdoor

La principale sorgente di CO è storicamente rappresentata dal traffico veicolare (circa l'80% delle emissioni a livello mondiale (Arpa Emilia Romagna, 2013)), essendo presente, in particolare, nei gas di scarico dei veicoli a benzina, ma anche dagli impianti

fissi di combustione e alcune attività industriali. La concentrazione di CO emessa dagli scarichi dei veicoli è strettamente connessa alle condizioni di funzionamento del motore: si registrano concentrazioni più elevate con motore al minimo e in fase di decelerazione, condizioni tipiche di traffico urbano intenso e rallentato.

1.1.1.3 Valori limite

Il valore di riferimento per la concentrazione di monossido di carbonio nell'aria esterna è fissato a $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ dalla Direttiva 2008/50/CE, con un margine di tolleranza del 60%, come media massima giornaliera su un periodo di 8h.

1.1.1.4 Dati di rilevazione

Si riportano in Figura 1-1 i dati di concentrazione rilevati mediante la Rete regionale di monitoraggio della qualità dell'aria che consentono una immediata valutazione delle tendenze rilevate nel corso degli ultimi 5 anni in Emilia Romagna, calcolando la media dei valori massimi orari, con il relativo range max-min e la media massima sulle 8 ore.

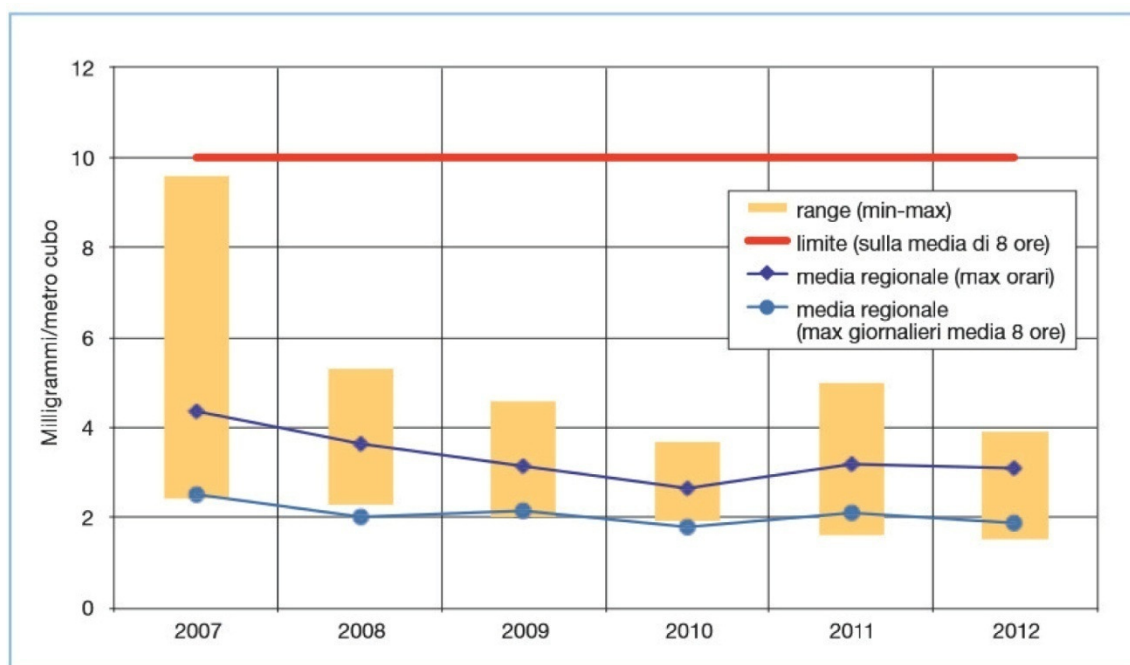


Figura 1-1 - Monossido di carbonio (CO) – Andamento della media annuale delle concentrazioni massime orarie e dei massimi giornalieri della media mobile su 8 ore, a livello regionale (Arpa Emilia Romagna, 2013)

Dall'analisi dei dati si rileva come, oltre a restare sotto la metà del valor limite previsto, i valori di concentrazione media annuale regionale del monossido di carbonio risultino in continua discesa negli ultimi 5 anni, a testimonianza che il lavoro di aggiornamento dei propulsori dei veicoli a benzina ha favorito la riduzione degli inquinanti primari.

1.1.1.5 Sorgenti indoor

Oltre ad infiltrazioni provenienti dall'aria esterna, le sorgenti interne di monossido di carbonio sono essenzialmente le caldaie, le stufe, i fornelli non ventilati, i camini, il fumo di tabacco e ovviamente la presenza di un box auto direttamente connesso con gli ambienti interni. Anche l'incenso bruciato può essere una fonte di esposizione al monossido di carbonio: i tassi di emissione variano tra 144 e 531 mg/h (WHO Europe, 2010). Nelle abitazioni i moderni generatori di calore di tipo stagno (apparecchi di tipo C) non necessitano di alcun controllo della ventilazione a patto che essi siano regolarmente mantenuti; non è questo il caso degli apparecchi di tipo B o A di vecchia concezione o degli apparecchi di cottura a gas (per i quali si rimanda al capitolo sulla sicurezza degli impianti).

1.1.1.6 Valori limite

I valori limite per la concentrazione di monossido di carbonio nell'aria interna sono mediati su differenti periodi di tempo: per un periodo di 15 minuti la concentrazione massima deve essere inferiore a 100 mg/m³, 35 mg/m³ per 1h, 10 mg/m³ per 8h e 7 mg/m³ nell'arco di una giornata.(WHO Europe, 2010)

1.1.1.7 Dati di rilevazione

I livelli medi indoor di CO all'interno delle abitazioni variano da 0,7 a 11mg/m³ con variazioni dipendenti dall'uso; ad esempio in abitazioni con cucine dotate di fornelli a gas si sono misurati livelli fino a 60 mg/m³ (Raisa, et al., 2010)

1.1.2 Biossido di carbonio (CO₂)

La CO₂ è un gas inerte, inodore e incolore; è un prodotto della combustione, del processo di respirazione, delle attività metaboliche umane e costituisce oggi il principale responsabile dell'aumento dell'effetto serra antropicamente indotto.

1.1.2.1 Effetti sulla salute

Il biossido di carbonio è un prodotto di rifiuto degli organismi che ottengono l'energia dall'ossidazione degli zuccheri o dei grassi, attraverso il metabolismo. Nell'uomo il biossido di carbonio si muove nel sangue (in soluzione) andando dai tessuti del corpo ai polmoni, dove viene espirato. E' quindi un gas tossico dato che va a saturare l'emoglobina del sangue impedendole di legarsi all'ossigeno e bloccando quindi l'ossigenazione dei tessuti. Sono tollerate concentrazioni massime di 1000 ppm (0,1%) mentre per concentrazioni superiori allo 0,5% (5.000 ppm) il biossido di carbonio causa sonnolenza e disturbi gravi si manifestano a partire da concentrazioni intorno al 3% (confusione, perdita di conoscenza) (ISAAC, 2006)

1.1.2.2 Sorgenti outdoor

La combustione del combustibile fossile per la produzione di energia causa circa il 70-75% delle emissioni di anidride carbonica, mentre il restante 20-25% è causato da disboscamento, incendi e dalle emissioni dagli scarichi degli autoveicoli (Lenntech, 2013)

1.1.2.3 Valori limite e dati di rilevazione

La concentrazione di CO₂, se l'aria è pulita, si attesta intorno allo 0,03%. (300 ppm) Nell'atmosfera risulta attualmente pari a circa 390 ppm, con un ritmo di crescita di 2,5 ppm annue: il limite di concentrazione atmosferica di CO₂ per poter limitare il surriscaldamento globale per effetto serra è stato quantificato in 400 ppm, un limite che potrebbe a breve essere superato soprattutto se l'uomo continuerà ad emettere in

atmosfera 10 miliardi di tonnellate di anidride carbonica all'anno come accade oggi, senza alcun serio provvedimento. (Bignami, 2013)

1.1.2.4 Sorgenti indoor e dati di rilevazione

Le principali fonti di biossido di carbonio negli ambienti abitabili sono rappresentate dalle persone, che attraverso la respirazione emettono aria con un contenuto pari a 4% di CO₂, dagli impianti di riscaldamento e dagli apparecchi di cottura.

Si riporta di seguito la Tabella 1-1 riguardante i tassi di produzione di CO₂ da parte delle persone, in funzione dell'attività svolta.

Età	Attività	Potenza metabolica [W]	Portata d'aria inspirata [m ³ /h]	Portata di CO ₂ espirata [l/h]
Adulto	a riposo	74	< 0,4	12
	lavoro sedentario	110	0,5 - 0,6	18
	in piedi	130	0,6 - 0,9	21
	in cammino (4 km/h)	240	0,9 - 1,5	39
	sport (tennis)	350 - 500	2,4 - 3,0	50-80
Bambini 3-6 anni		125	-	18
Ragazzi 12-14 anni		85	-	19

Tabella 1-1 - Tassi di produzione di CO₂, in funzione dell'attività svolta (Magrini, 2011)

In Tabella 1-2 (tratta dalla norma CEN TR 14788) sono riportati i tassi di produzione di CO₂ dovuti alla combustione dei combustibili normalmente utilizzati nelle abitazioni.

Combustibile	CO ₂ (l/s per kW di input)	Vapore acqueo (g/h per kW di input)
Gas naturale	0,027	150
Gas artificiale	0,027	100
GPL	0,033	130
Kerosene	0,034	100

Tabella 1-2 - Apparecchi per la combustione: tassi di produzione di diossido di carbonio e vapore acqueo (da CEN TR 14788)

1.1.2.5 Valori limite

Come sottolineato in precedenza, il valore massimo tollerato è pari a 1000 ppm (0,1%), circa 700 ppm al di sopra di quella atmosferica, risultato basato sulle osservazioni di Max Joseph von Pettenkofer (1818-1901).

1.1.3 Ossidi di azoto (NO_x)

Gli ossidi di azoto rilevanti per questa trattazione sono il monossido di azoto (NO) e il biossido di azoto (NO₂), gas bruno di odore acre e pungente. Sono entrambi gas inquinanti ossidanti, che si formano in processi di combustione a temperature elevate. Il biossido di azoto è un importante gas tracciante atmosferico perché:

- a) assorbe la radiazione solare visibile (fotolisi del biossido di azoto) e contribuisce alla compromissione della visibilità atmosferica (formazione di smog fotochimico)
- b) assorbe la radiazione visibile e ha un ruolo potenzialmente diretto nel cambiamento climatico globale;
- c) svolge un ruolo fondamentale nel determinare le concentrazioni di ozono nella troposfera perché la fotolisi del biossido di azoto è l'iniziatore chiave della formazione di ozono a livello del suolo, aumentandone la concentrazione fino a livelli che possono risultare tossici. (WHO Europe, 2006)

1.1.3.1 Effetti sulla salute

Il biossido di azoto è un gas irritante per le mucose e può contribuire all'insorgere di varie alterazioni delle funzioni polmonari, come bronchiti croniche, asma ed enfisemi polmonari. Nelle persone particolarmente sensibili si possono riscontrare effetti negativi già a partire da brevi esposizioni a valori di NO₂ superiori a 300 µg/m³ (difficilmente riscontrabili all'interno delle abitazioni) (ISAAC, 2006)

1.1.3.2 Sorgenti outdoor

Nei paesi industrializzati le principali sorgenti di NO_x sono i gas di scarico dei veicoli a motore, gli impianti di riscaldamento e alcuni processi industriali, oltre ad una minima parte proveniente da processi naturali (fulmini e vulcani).

1.1.3.3 Valori limite

I valori limite per la protezione della salute umana fanno riferimento a due periodi di mediazione: il primo di 1h, nel quale il valore di $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ non deve essere superato più di 18 volte per anno civile e il secondo riferito a una media annua per un valore massimo di $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (WHO , 2006)

1.1.3.4 Dati di rilevazione

Si riportano in Figura 1-2 i dati di concentrazione rilevati mediante la Rete regionale di monitoraggio della qualità dell'aria che consentono una immediata valutazione delle tendenze rilevate nel corso degli ultimi 5 anni in Emilia Romagna, calcolando la media totale, il range max-min totale e per tipologia di stazione.

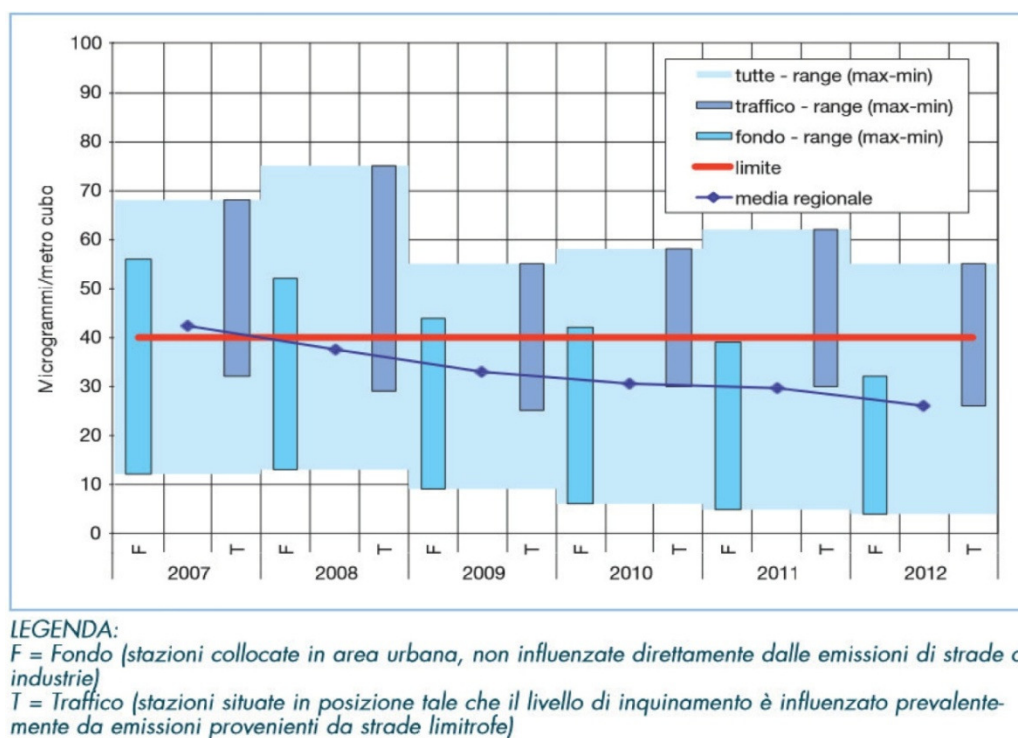


Figura 1-2 - Biossido di azoto (NO_2) – Andamento della concentrazione media annuale a livello regionale, per tipologia di stazione (Arpa Emilia Romagna, 2013)

La variazione temporale della concentrazione media annuale dell' NO_2 a partire dal 2007 registra un andamento in lieve calo; tale trend è particolarmente rilevante per le stazioni di fondo, che stanno lentamente rientrando nei limiti, mentre per quelle da traffico il calo

è meno sensibile ed è ancora consistente il numero delle stazioni con valori superiori al limite di legge, a testimonianza ulteriore dell'estrema importanza rivestita dall'NO₂ nell'ambito delle problematiche di inquinamento dell'aria in regione. (Arpa Emilia Romagna, 2013)

1.1.3.5 Sorgenti indoor

All'interno delle abitazioni le principali fonti di ossidi d'azoto sono i fornelli a gas per la cottura, i radiatori a cherosene, le stufe e i radiatori a gas privi di scarico e il fumo di tabacco.

1.1.3.6 Valori limite

I valori limite per gli ambienti interni, secondo quanto riportato dalle linee guida del WHO si attestano a 200 µg/m³ (0,1 ppm) mediati su un periodo di 1h e 40 µg/m³ (0,02 ppm) in un anno civile. (WHO Europe, 2010)

1.1.3.7 Dati di rilevazione

Nelle abitazioni si riscontrano concentrazioni inferiori a 250 µg/m³ (0,12 ppm) mentre i valori più elevati si rilevano nelle cucine dove, durante la cottura di cibi si raggiungono concentrazioni anche superiori a 1000 µg/m³. In presenza di stufe e fornelli a gas il valore più frequente del rapporto tra concentrazione indoor e outdoor è tra 2 e 3 e raggiunge circa 5 nel caso di sistemi di riscaldamento e fornelli a gas con ventilazione e scarico all'esterno inefficienti. La concentrazione nelle stanze da letto è tipicamente la metà di quella rilevata in una cucina con fornelli a gas. (Raisa, et al., 2010)

La concentrazione di biossido di azoto indoor è anche funzione delle variazioni stagionali; è massima in particolare durante la stagione invernale in corrispondenza dei momenti di preparazione dei pasti anche a causa di una minore aerazione dei locali, per evitare correnti d'aria fredde e fuoriuscita di calore. (ISAAC, 2006)

1.1.4 Ossidi di zolfo (SO_x)

Il più diffuso ossido di zolfo in atmosfera è l'anidride solforosa (SO₂) seguito dall'anidride solforica (SO₃). L'anidride solforosa è un gas incolore, irritante, non infiammabile, molto solubile in acqua e dall'odore pungente; in atmosfera, attraverso reazioni con l'ossigeno e le molecole d'acqua, contribuisce alla formazione delle piogge acide, con effetti tossici sui vegetali, acidificazione dei corpi idrici e conseguente compromissione della vita acquatica ed effetti corrosivi anche sui materiali da costruzione. A livello antropico SO₂ e SO₃ sono prodotti nelle reazioni di ossidazione per la combustione di materiali nei quali è presente lo zolfo come contaminante (gasolio, nafta, carbone, ecc) utilizzati per la produzione di energia. In natura tale tipo di inquinamento è causato dalle eruzioni vulcaniche.

1.1.4.1 Effetti sulla salute

A basse concentrazioni gli effetti del biossido di zolfo sono principalmente legati a patologie dell'apparato respiratorio come bronchiti, tracheiti, asma, irritazioni della pelle, occhi e mucose. Brevi esposizioni ad alte concentrazioni possono provocare aumento del ritmo respiratorio e del battito cardiaco, irritazioni agli occhi, naso e gola. (Raisa, et al., 2010)

1.1.4.2 Sorgenti outdoor

La principale fonte di inquinamento è costituita dalla combustione di combustibili fossili (carbone e derivati del petrolio) in cui lo zolfo è presente come impurezza. Le fonti naturali, come i vulcani, contribuiscono all'aumento dei livelli ambientali di biossido di zolfo: quando questo raggiunge la stratosfera si trasforma in particelle di acido solforico che riflettono i raggi solari, in parte riducendo le radiazioni che raggiungono il suolo terrestre.

Negli ultimi anni le emissioni provocate dall'uomo (a causa di riscaldamento e traffico) sono notevolmente diminuite grazie all'utilizzo sempre crescente del metano e alla

diminuzione della quantità di zolfo contenuta nel gasolio e in altri combustibili liquidi e solidi. (WHO Europe, 2006)

1.1.4.3 Valori limite

Il D.Lgs. 155/2010, in linea con la Direttiva 2008/50/CE, indica i seguenti valori limite: per un periodo di mediazione di 1h la concentrazione deve essere inferiore a $350 \mu\text{g}/\text{m}^3$ da non superare più di 24 volte per anno civile, mentre su una media giornaliera deve risultare inferiore a $125 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Le linee guida WHO del 2005 indicano invece i seguenti valori di riferimento: $500 \mu\text{g}/\text{m}^3$ per un periodo di 10 minuti e $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ nell'arco di una giornata. Le linee guida WHO precedenti (1999) indicavano anche un valore mediato su un anno civile, quantificato in $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

1.1.4.4 Dati di rilevazione

Si riportano i dati di concentrazione, rilevati attraverso la Rete regionale di monitoraggio della qualità dell'aria, elaborati a livello regionale, calcolando sia la media annuale (Figura 1-3), che la media dei massimi orari (Figura 1-4) e i relativi range max-min. Ciò consente una immediata valutazione delle tendenze rilevate nel corso degli ultimi 5 anni sull'intera regione.

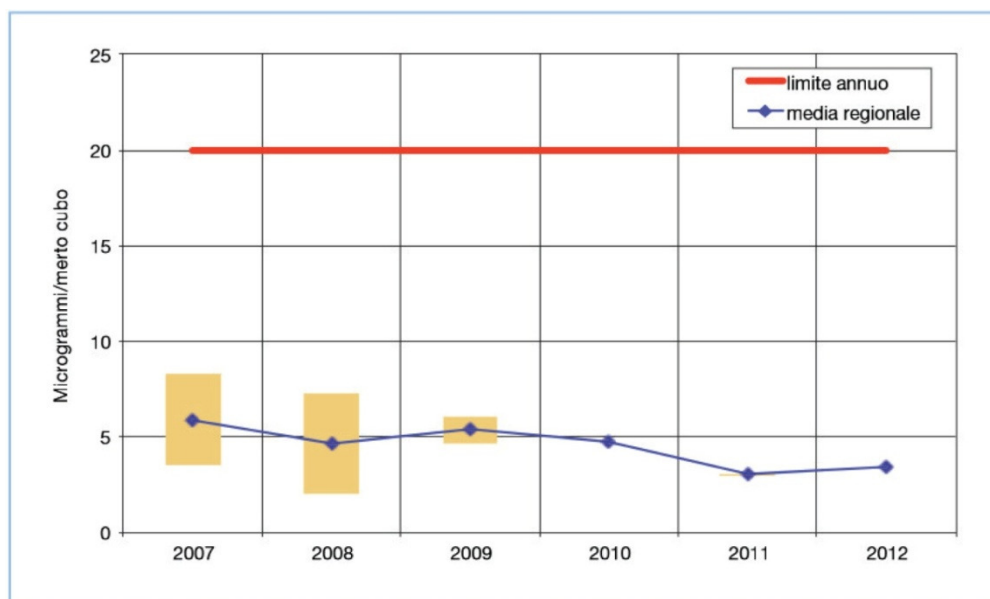


Figura 1-3 - Biossido di zolfo (SO_2) – Andamento della concentrazione media annuale a livello regionale (Arpa Emilia Romagna, 2013)

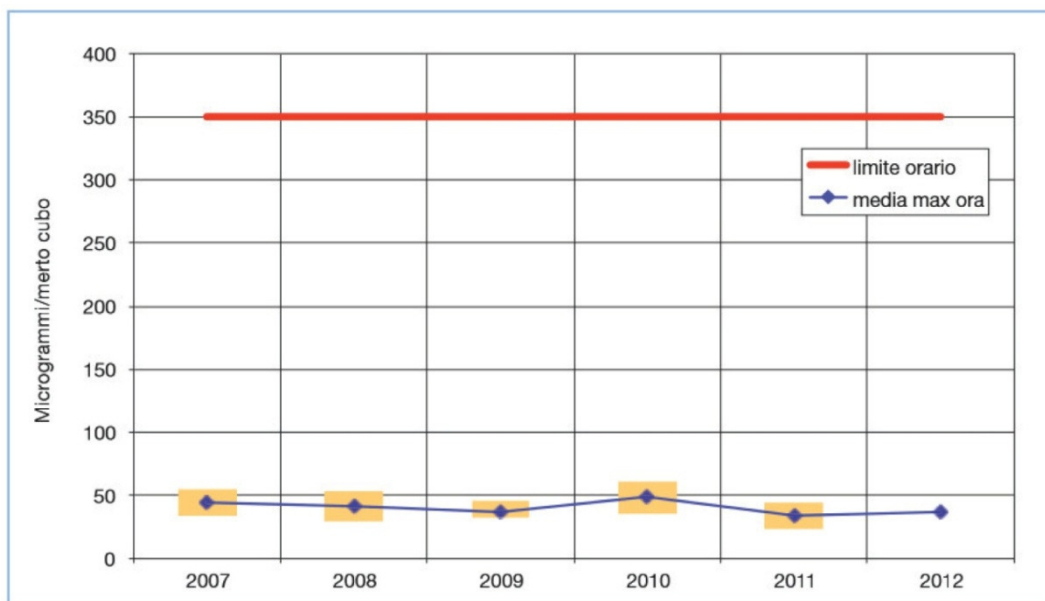


Figura 1-4 - Biossido di zolfo (SO₂) – Andamento annuale della media della concentrazione massima oraria, a livello regionale (Arpa Emilia Romagna, 2013)

Dall'analisi dei dati della Figura 1-3 si evince una costanza dei valori misurati, circa 4 volte inferiori al limite previsto (20 µg/m³). Anche per il trend annuale della concentrazione massima oraria (Figura 1-4) si conferma una sostanziale costanza dei valori, qui addirittura circa 7 volte inferiori al valore limite previsto (350 µg/m³). (Arpa Emilia Romagna, 2013)

1.1.4.5 Sorgenti indoor

Nelle abitazioni le principali fonti di SO₂ sono costituite da stufe e radiatori a cherosene, stufe e radiatori a gas privi di scarico e fumo di tabacco. (Raisa, et al., 2010)

1.1.4.6 Valori limite

I valori limite per gli ambienti interni sono ricavati dalle linee guida del WHO e si attestano a 0,047 ppm (130 µg/m³) per un periodo di mediazione di 24h e 0,019 ppm (54 µg/m³) per un anno civile. (ASHRAE, 2009)

1.1.4.7 Dati di rilevazione

Negli ambienti abitabili solitamente le concentrazioni medie di SO₂ sono comprese tra 45 e 150 µg/m³ mentre in quelle riscaldate con stufe a cherosene si raggiungono valori elevati superiori a 250 µg/m³. (Ministero della Salute, 2001)

1.1.5 Ozono (O₃)

L'ozono è un gas di colore azzurro chiaro, velenoso, instabile e dall'odore pungente che si forma nella bassa atmosfera (troposfera) a seguito di reazioni fotochimiche attivate dalla luce solare. Infatti i raggi ultravioletti decompongono il biossido di azoto in monossido di azoto e ossigeno il quale può combinarsi con altro ossigeno per produrre ozono (O₃). Negli strati alti dell'atmosfera terrestre (stratosfera) l'ozono invece aiuta a proteggere la vita sulla terra, creando uno scudo protettivo che filtra i raggi ultravioletti del sole.

1.1.5.1 Effetti sulla salute

In qualità di forte ossidante di biomolecole e produttore di radicali liberi, ha effetti sull'uomo anche a concentrazioni minime, per le quali si manifestano stanchezza, mal di testa, limitazione delle capacità respiratorie. Intorno ai 0,008-0,02 ppm (15-40 µg/m³) è già possibile rilevarne l'odore; a 0,1 ppm provoca una irritazione agli occhi ed alla gola per la sua azione nei confronti delle mucose mentre concentrazioni più elevate possono causare irritazioni all'apparato respiratorio. (Raisa, et al., 2010)

1.1.5.2 Sorgenti outdoor

L'ozono si produce, oltre che in modo naturale come prodotto di reazioni fotochimiche, anche per effetto dell'immissione di solventi e ossidi di azoto dalle attività umane. L'immissione di inquinanti primari prodotti ad esempio dal traffico, dai processi di combustione e dai solventi favorisce la produzione di un eccesso di ozono rispetto alle quantità solitamente presenti in natura nel periodo estivo. (Arpa Emilia Romagna, 2013)

1.1.5.3 Valori limite

Il valore limite proposto dalla Direttiva 2008/50/CE recepita dal D.Lgs. 155/2010 è pari a $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (0,06 ppm) come valore massimo giornaliero della media su 8 ore da non superare più di 25 volte/anno come media su 3 anni. Le linee guida WHO del 2005 indicano invece un valore più restrittivo, pari a $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ mediato su un periodo di 8h.

1.1.5.4 Dati di rilevazione

Viene presentato il numero di superamenti in un anno del valore obiettivo a lungo termine (Figura 1-5), calcolati sia come media regionale su tutte le stazioni, sia come differenza tra il numero massimo e il minimo dei superamenti di ciascuna tipologia di stazione (urbana, suburbana e rurale).

Questo consente una immediata valutazione delle tendenze rilevate nel corso degli ultimi 5 anni sull'intera regione sia su tutte le stazioni, che per ciascuna tipologia di stazione.

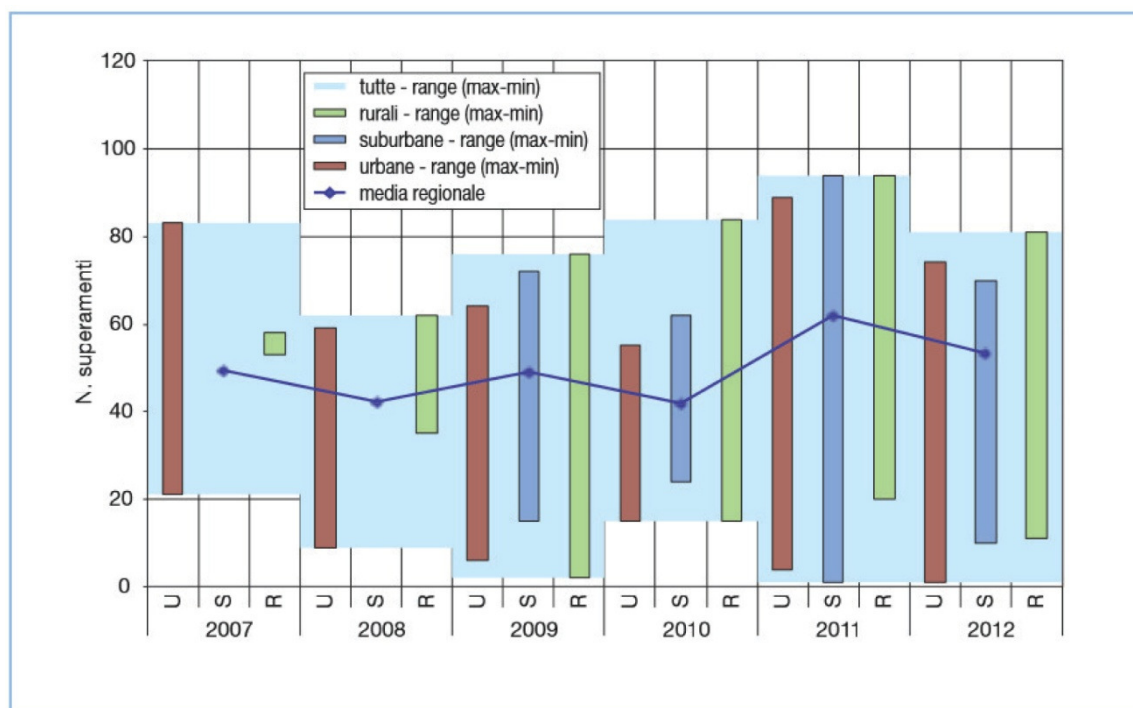


Figura 1-5 - Ozono (O_3) – Andamento del numero di superamenti dell'obiettivo a lungo termine per la protezione della salute umana a livello regionale, per tipologia di stazione (Arpa Emilia Romagna, 2013)

Il livello di protezione per la salute per l'ozono viene sistematicamente superato ogni anno sull'intera regione. L'andamento non è regolare, evidenziando come la soluzione del problema legato all'inquinamento da ozono risulti molto più complessa rispetto a quella degli altri inquinanti.

1.1.5.5 Sorgenti indoor

In assenza di specifiche sorgenti interne, come ad esempio fotocopiatrici, stampanti laser o lampade ultraviolette, e nelle condizioni normali di ventilazione degli edifici la principale sorgente di ozono indoor è costituita dall'aria esterna. (Raisa, et al., 2010)

1.1.5.6 Valori limite

La concentrazione mediata in 8h deve essere inferiore a 0,06 ppm ($120 \mu\text{g}/\text{m}^3$), valore equivalente a quello dell'aria esterna, essendo quest'ultima la fonte principale di ozono nelle abitazioni.

1.1.6 Benzene (C_6H_6)

Il benzene è una sostanza chimica liquida e incolore dal caratteristico odore aromatico pungente. A temperatura ambiente volatilizza facilmente, cioè passa dalla fase liquida a quella gassosa, infatti nell'aria lo si trova praticamente sempre nella fase di vapore.

Esso fa parte della famiglia dei VOC (*Volatile Organic Compounds*): sono definiti tali i composti organici che alla temperatura di 20°C possiedono una pressione di vapore pari a 0,01 kPa o superiore. (Raisa, et al., 2010 p. 50)

Appartengono a tale gruppo gli alcoli (etanolo, propanolo), gli esteri, i chetoni, i terpeni, gli idrocarburi policiclici aromatici (IPA - benzene, stirene), idrocarburi alogenati (cloroformio) e le aldeidi (come la formaldeide).

Le concentrazioni dei VOC sono di solito superiori negli ambienti interni rispetto all'aria esterna in quanto legati all'utilizzo di colle, cere, vernici, deodoranti e antiparassitari; sono inoltre generati dai processi di combustione, fumo di tabacco e dal metabolismo umano.

I tassi di emissione non sono però costanti durante la vita di un edificio poiché si assiste ad un picco durante i primi periodi per poi passare a basse emissioni. Correlato a ciò è il tasso di ventilazione: a bassi livelli di ricambio di aria corrispondono emissioni più elevate e durature nel tempo.

1.1.6.1 Effetti sulla salute

L'effetto più noto dell'esposizione cronica riguarda la potenziale cancerogenicità del benzene sul sistema emopoietico (cioè sul sangue). L'Agenzia Internazionale per la Ricerca sul Cancro (IARC) classifica il benzene come sostanza cancerogena di classe I, in grado di produrre diverse forme di leucemia. (Arpa Emilia Romagna, 2013)

1.1.6.2 Sorgenti outdoor

La benzina utilizzata ad oggi nelle automobili rappresenta la principale sorgente di benzene nell'aria esterna. Viene utilizzato, insieme ad altri composti aromatici per conferire le proprietà antidetonanti e in sostituzione totale (benzina verde) o parziale (benzina super) dei composti del piombo.

Altre sorgenti esterne sono le stazioni di servizio e alcune industrie, come quelle che utilizzano e producono carbone, petrolio, gas naturale, prodotti chimici e acciaio.

1.1.6.3 Valori limite

Il valore di riferimento per la concentrazione di benzene nell'aria esterna è fissato a 5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ dalla Direttiva 2008/50/CE, mediato su un periodo di 1 anno civile.

1.1.6.4 Dati di rilevazione

Si riportano in Figura 1-6 i dati di concentrazione rilevati mediante la Rete regionale di monitoraggio della qualità dell'aria che consentono una immediata valutazione delle tendenze rilevate nel corso degli ultimi 5 anni in Emilia Romagna, calcolando la media e il range max-min.

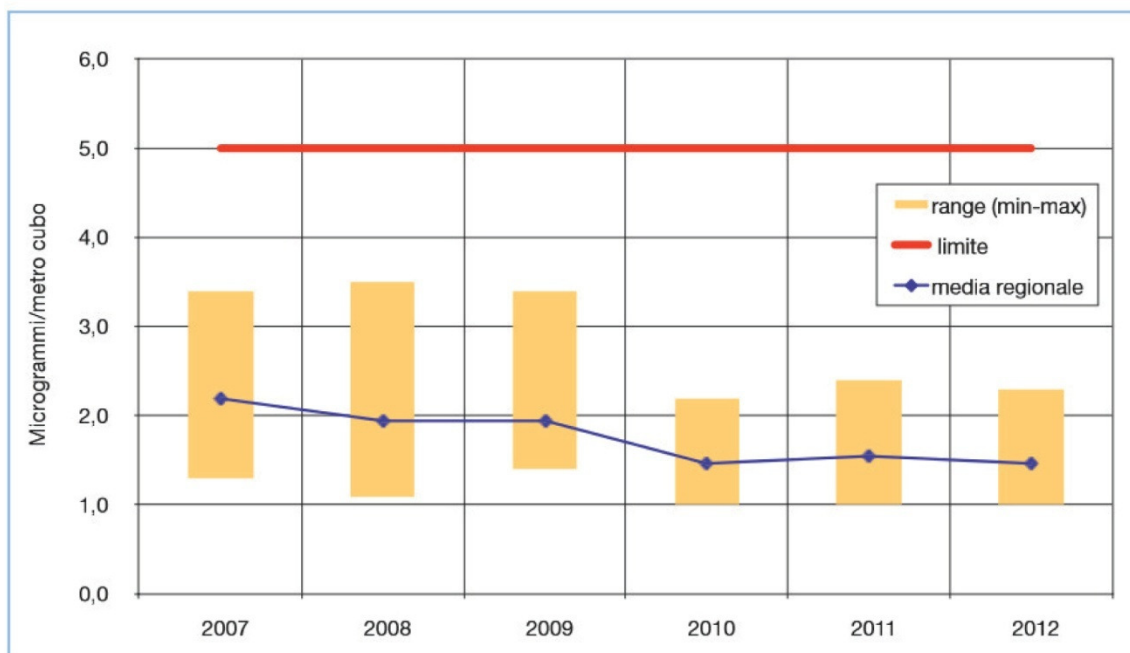


Figura 1-6 - Benzene (C₆H₆) – Andamento della concentrazione media annuale a livello regionale (Arpa Emilia Romagna, 2013)

L'analisi dei dati pluriennali rileva valori sempre inferiori al limite e una lieve diminuzione della concentrazione media annuale a livello regionale nel 2012 rispetto agli anni precedenti, rimanendo al di sotto della metà del valore limite previsto dalla normativa, indice che l'aggiornamento dei propulsori e la formulazione dei carburanti dei veicoli a benzina ha provveduto alla riduzione di tale inquinante.

1.1.6.5 Sorgenti indoor

L'aria interna può essere inquinata da benzene proveniente dall'aria esterna a causa di un eccessivo traffico veicolare ma anche da sorgenti in ambiente. Ad oggi la maggior parte del benzene prodotto (85% (Arpa Emilia Romagna, 2013)) trova impiego nella chimica come materia prima per composti secondari a loro volta utilizzati per produrre plastiche, resine, detersivi, vernici, prodotti per la pulizia; tutto ciò si può trovare abitualmente all'interno delle nostre abitazioni. Alcuni studi hanno ravvisato comunque che il tasso di emissione di benzene dei materiali decade progressivamente fino a raggiungere un valore stazionario dopo circa un anno (WHO Europe, 2010).

L'origine di benzene indoor, oltre ai materiali succitati, è dovuto particolarmente alla presenza di box auto direttamente collegati alle abitazioni, all'utilizzo di combustibili

fossili, ad alcune attività umane, al fumo di tabacco (ETS) e alla bruciatura dell'incenso(fino a $117 \mu\text{g}/\text{m}^3$) (European Commission, 2005).

I box auto connessi agli ambienti abitabili sono una potenziale sorgente di benzene ($16-19 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (WHO Europe, 2010)), sia per la presenza di vapori di benzina che per alcuni materiali come vernici, oli, solitamente stoccati in questi ambienti.

L'utilizzo di combustibili come carbone, legna, gas, kerosene o GPL per il riscaldamento degli spazi contribuisce all'incremento della concentrazione di benzene; in particolare concentrazioni variabili tra 44 e $167 \mu\text{g}/\text{m}^3$ sono state associate all'uso di stufe a kerosene (Pandit, et al., 2001).

Il fumo di tabacco è considerato una delle principali sorgenti di benzene indoor (WHO Europe, 2010); le emissioni variano da 430 a $590 \mu\text{g}$ per sigaretta (Singer, et al., 2003) e in alcuni casi la concentrazione di benzene dovuta al fumo di tabacco è incrementata fino a valori di $16 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (WHO Europe, 2010).

1.1.6.6 Valori limite

Non sono disponibili ad oggi valori limite di esposizione; la probabilità di casi di leucemia è pari a 6×10^{-6} con un livello di concentrazione pari a $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (WHO Europe, 2010)

1.1.6.7 Dati di rilevazione

A livello europeo si è osservato un andamento crescente di concentrazioni indoor da nord a sud. Concentrazioni dell'ordine di $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ sono state valutate nelle abitazioni finlandesi, mentre nelle città dell'Europa centrale si attestano tra 2 e $12 \mu\text{g}/\text{m}^3$ e tra 10 e $13 \mu\text{g}/\text{m}^3$ in città dell'Europa meridionale come Milano o Atene. (WHO Europe, 2010)

1.1.7 Formaldeide

La formaldeide (HCOH) è un composto organico della famiglia delle aldeidi.

Si forma principalmente dalla combustione incompleta di molte sostanze organiche fra cui lo zucchero ed il legno ed è emesso anche da resine urea-formaldeide usate per

l'isolamento (UFFI – Urea Formaldehyde Foam Insulation) e da resine per truciolati e compensati in legno e materiali da arredamento.

A temperatura ambiente si presenta come un gas incolore caratterizzato da un odore pungente molto irritante.

L'Organizzazione Mondiale della Sanità nel 2004 ha stabilito che la formaldeide è un agente cancerogeno per l'uomo, inserendola nel gruppo 1.

1.1.7.1 Effetti sulla salute

Anche a concentrazioni piuttosto basse ($0,1 \text{ mg/m}^3 = 0,08 \text{ ppm}$) a contatto con la pelle o le mucose la formaldeide può dar luogo ad irritazioni, e provocare nelle vie respiratorie iperattività bronchiale e asma; concentrazioni nell'ordine di 35 mg/m^3 (30 ppm) sono altamente tossiche.

1.1.7.2 Sorgenti outdoor

La formaldeide è presente nell'aria esterna generandosi per foto-ossidazione del metano e di altri composti organici naturali. Ulteriori contributi alla presenza di HCOH provengono dai gas di scarico delle automobili, dai processi di combustione e dalle attività industriali, soprattutto dalla produzione di resine.

1.1.7.3 Dati di rilevazione

E' presente nella bassa atmosfera in concentrazioni molto basse, sull'ordine di $1 \text{ } \mu\text{g/m}^3$ (0,0008 ppm). Nelle aree urbane i valori medi annuali si aggirano attorno ai 5-10 $\mu\text{g/m}^3$ (0,004-0,008 ppm) e livelli ancora più elevati si riscontrano in vicinanza di stabilimenti ove hanno luogo processi industriali. (Barbieri, et al., 1996 p. 24)

1.1.7.4 Sorgenti indoor

I principali emettitori di HCOH sono costituiti da componenti dell'arredamento, tessuti,

rivestimenti, prodotti di verniciatura, collanti, solventi, isolanti termici o acustici e anche il fumo di tabacco (ETS).

Negli anni '70 si utilizzava la schiuma isolante di urea-formaldeide (UFFI) per riempire, isolando, le cavità nelle murature degli edifici; le concentrazioni di questa sostanza erano elevate in seguito all'applicazione del prodotto, ma diminuivano velocemente dopo pochi mesi dalla messa in opera.

1.1.7.5 Valori limite

Il valore di riferimento per la concentrazione di formaldeide nell'aria interna è fissato a $0,1 \text{ mg/m}^3$, mediati su un periodo di 30 minuti, al fine di prevenire, a lungo termine, tumori al cavo faringeo e leucemia mieloide.

1.1.7.6 Dati di rilevazione

Negli ambienti interni i livelli di formaldeide sono di solito compresi tra 10 e $50 \text{ } \mu\text{g/m}^3$ (Raisa, et al., 2010); si possono riscontrare concentrazioni particolarmente elevate in edifici prefabbricati e in locali in cui sono stati posati mobili in truciolato o moquette

1.1.8 ETS (*Enviromental Tobacco Smoke*)

Il fumo di tabacco ambientale è costituito da particelle e gas risultanti dalla combustione del tabacco. Risulta costituito da due parti: la principale è la frazione di fumo inalata dai fumatori, filtrata dai polmoni e in seguito espirata, mentre la secondaria è quella rilasciata dalla sigaretta tra un'inalazione e l'altra.

Fino ad oggi sono state individuate circa 3800 composti sotto forma di particolato o gas (Raisa, et al., 2010 p. 44). La Tabella 1-3 ne individua i principali, indicandone inoltre la frazione diretta e quella espirata e il relativo rapporto.

Componente mg/sigaretta	Tipo di fumo		Rapporto FD/FE
	diretto (FD)	espirato (FE)	
Catrame	34,5	10,2	3,4
Particolato	40	25	1,6
Nicotina	1,27	0,46	2,8
Ossido di carbonio	88	19	4,7
Formaldeide	4	0,08	51
Anidride carbonica	490	50	9,8
Ammoniaca	7,4	0,16	46
Ossidi di azoto	0,051	0,014	3,6
Fenoli	0,603	0,228	2,6
Catecoli	70 ·10 ⁻³	30 ·10 ⁻³	2,3
Benzopirene	51 ·10 ⁻³	15 ·10 ⁻³	3,4

Tabella 1-3 - Principali componenti di una sigaretta con filtro (Scieurpi)

1.1.8.1 Effetti sulla salute

Il fumo di tabacco in primo luogo rende sgradevole l'ambiente dal punto di vista olfattivo, inoltre all'ETS è stato attribuito un ampio spettro di effetti dannosi per la salute, sia a corto che a lungo termine: irritazioni, allergie, disturbi cardiovascolari, sindromi asmatiche, cancro del polmone ed altri disturbi cronici dell'apparato respiratorio.

Il fumo attivo è la principale causa di mortalità, in Italia come nel mondo occidentale (Raisa, et al., 2010 p. 45); lo IARC nel 2002 (Agenzia Internazionale per la Ricerca sul Cancro) lo ha classificato come agente cancerogeno per l'uomo (gruppo 1). Anche il fumo passivo è stato inserito nella lista degli agenti cancerogeni (gruppo 1) dallo IARC che, in base ad una serie di dati epidemiologici, lo ha identificato come possibile agente cancerogeno per il polmone, oltre a provocare un aumento del rischio di malattie ischemiche e disturbi cardiovascolari tra gli adulti. Inoltre è stato valutato come responsabile di una quota importante delle patologie respiratorie dell'infanzia (asma, otite, broncopolmonite)

1.1.8.2 Valori limite

La comunità scientifica internazionale ha sottolineato come la ventilazione non sia in grado di eliminare il rischio per la salute, ma solo di ridurlo. Non sono ancora stati individuati valori di soglia al di sotto dei quali non sussista rischio per la salute.

1.1.9 Particolato aerodisperso

Per particolato aerodisperso si intende l'insieme delle particelle atmosferiche liquide e solide: esse sono classificate secondo il diametro aerodinamico.

Il termine PM_{10} indica le particelle di diametro inferiore o uguale ai $10\ \mu m$ mentre il $PM_{2,5}$ identifica le particelle con diametro non superiore a $2,5\ \mu m$

1.1.9.1 Effetti sulla salute

Il Particolato Totale Sospeso (TSP) si distingue in una frazione inalabile (PM_{10}) e una non inalabile. Quella inalabile è composta a sua volta da una frazione extratoracica (particelle che non oltrepassano la laringe), una tracheobronchiale (le particelle oltrepassano la laringe ma non le vie respiratorie ciliate) e una frazione respirabile ($PM_{2,5}$) anche detta "alveolare". Ne consegue un effetto irritante per le vie respiratorie che può provocare asma, bronchite cronica, allergia, riduzione della funzione polmonare, ostruzione degli alveoli, oltre a disturbi cardiaci e alterazioni nel sistema immunitario.

La frazione non inalabile (particelle con diametro superiore a $10\ \mu m$) viene trattenuta dalle ciglia nasali e rimosse in maniera meccanica (con lo starnuto o soffiandosi il naso).

1.1.9.2 Sorgenti outdoor

Il particolato può avere sia un'origine naturale (sabbie, pollini, eruzioni vulcaniche, incendi, aerosol marino) sia antropica (combustioni ed emissioni industriali). Un importante contributo è fornito dal traffico veicolare.

1.1.9.3 Valori limite

PM_{10}

I valori limite per la protezione della salute umana fanno riferimento a due periodi di mediazione: il primo, riferito ad una media giornaliera da non superare più di 35 volte in un anno, è pari a $50\ \mu g/m^3$ mentre il secondo è riferito a una media annua per un valore massimo di $40\ \mu g/m^3$ secondo quanto riportato nel D.Lgs. 155/2010. Quest'ultimo valore

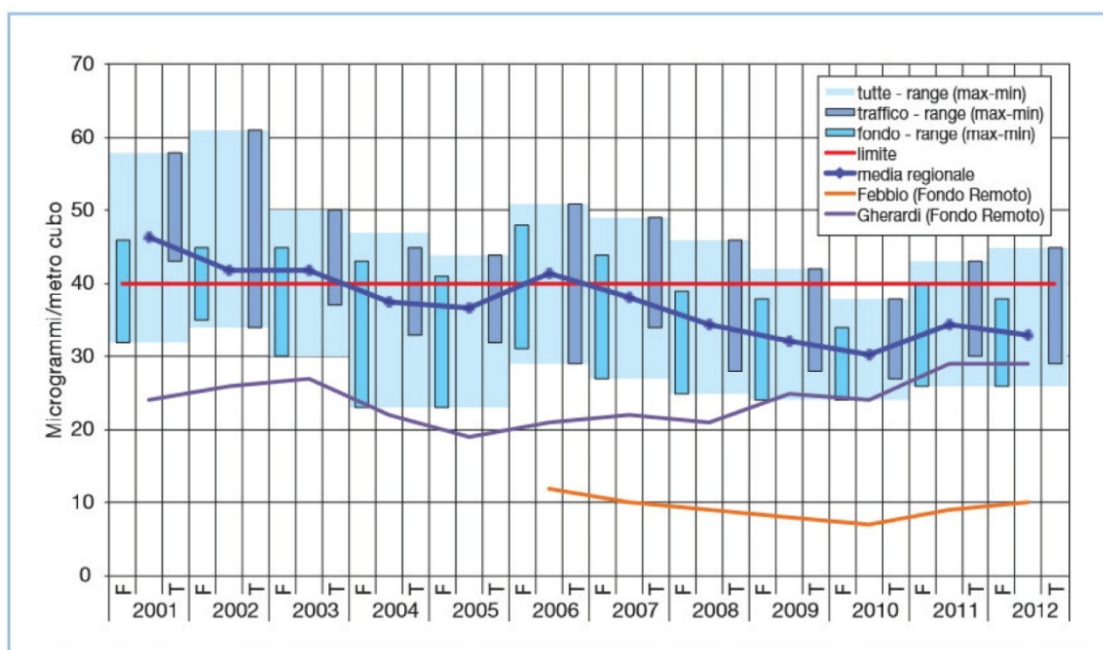
è molto differente dalle linee guida WHO che indicano come valore $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$. (WHO , 2006)

PM_{2,5}

Il valore limite per la protezione della salute umana al 2015 è riferito a una media annua per un valore massimo di $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ secondo il D.Lgs. 155/2010 mentre le linee guida WHO indicano i seguenti limiti: su una media giornaliera $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ mentre su un periodo di mediazione pari ad un anno il valore si attesta a $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (WHO , 2006).

1.1.9.4 Dati di rilevazione

Si riportano di seguito i dati di rilevazione con andamenti pluriennali, ottenuti calcolando la concentrazione media regionale e l'intervallo di variazione (max-min) della concentrazione media annuale rilevata da tutte le stazioni della rete regionale e per tipologia di stazione sia per quanto riguarda il PM₁₀ che il PM_{2,5}.



LEGENDA:

F = Fondo (stazioni collocate in area urbana, non influenzate direttamente dalle emissioni di strade o industrie)
T = Traffico (stazioni situate in posizione tale che il livello di inquinamento è influenzato prevalentemente da emissioni provenienti da strade limitrofe)

Figura 1-7 - PM₁₀ – Andamento della concentrazione media annuale a livello regionale, per tipologia di stazione (Arpa Emilia Romagna, 2013)

L'analisi del grafico di Figura 1-7 indica evidenza come le situazioni di superamento del limite annuale di PM_{10} in Emilia Romagna siano in progressiva diminuzione; fattore importante che incide sulle variazioni di concentrazione media da un anno all'altro è l'andamento meteorologico.

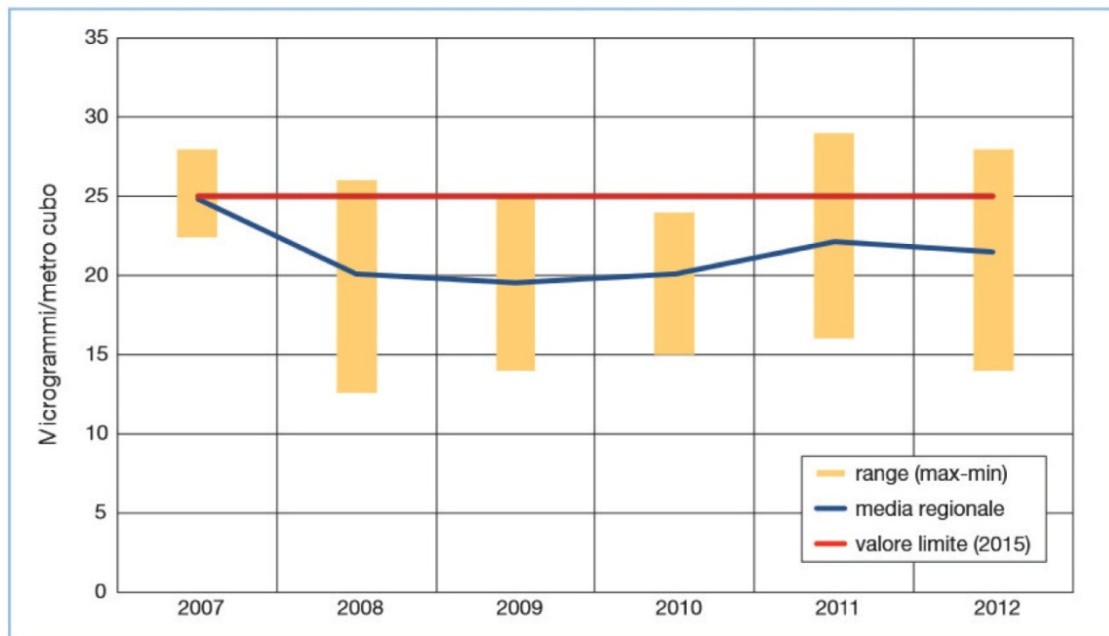


Figura 1-8 - $PM_{2,5}$ – Andamento della concentrazione media annuale a livello regionale (Arpa Emilia Romagna, 2013)

Il grafico di Figura 1-8 (riferito a $PM_{2,5}$) riporta a livello regionale una situazione stabile, sia per l'andamento della concentrazione media annuale che per l'intervallo di variazione (range max-min), tra il 2011 e il 2012.

1.1.9.5 Sorgenti indoor

Le principali sorgenti di particolato negli ambienti indoor sono tutti gli apparati di combustione, il fumo di tabacco, ma soprattutto anche l'aria inquinata esterna. Infatti, in assenza di idonei sistemi di ventilazione filtranti, l'inquinamento esterno si trasmette integralmente all'interno e ciò è dovuto al fatto che l'involucro dell'edificio e porte e finestre non sono in grado di fungere da schermo nei confronti del trasporto di particelle.

1.2 Inquinanti fisici

1.2.1 Radon

Il radon è un gas radioattivo incolore, inodore, insapore, presente naturalmente nel suolo, chimicamente non reagente ma estremamente volatile. Deriva dal radio che a sua volta si origina da decadimenti successivi dell'uranio

1.2.1.1 Effetti sulla salute

E' stato classificato come agente cancerogeno di gruppo 1 dallo IARC ed è considerato la seconda causa di cancro polmonare dopo il fumo di sigaretta.

In generale la presenza di radioattività è causa di effetti patogeni alle zone bronco-polmonari e favorirebbe l'insorgere del cancro alla gola e alle parti alte del sistema bronchiale. Si stima che in Italia il radon sia la causa di circa 3000 morti l'anno. (Raisa, et al., 2010 p. 54)

1.2.1.2 Sorgenti outdoor

La principale fonte esterna di radon è costituita dal gas nel sottosuolo, che si origina dal terreno e dalle acque di falda (il terreno contiene di solito circa 3 ppm di uranio (Raisa, et al., 2010 p. 53)). Le concentrazioni sono molto elevate e variabili, in funzione delle condizioni geologiche locali; i valori più alti si hanno in corrispondenza di zone vulcaniche dove abbondano tufi e lave.

1.2.1.3 Dati di rilevazione

La concentrazione naturale di radon nell'aria ambiente esterna è pari a circa 10 Bq/m³. (WHO Europe, 2000 p. 215)

1.2.1.4 Sorgenti indoor

Principalmente il radon penetra negli ambienti interni per infiltrazione dal sottosuolo ed è emesso anche, in maniera molto inferiore, dai materiali da costruzione.

1.2.1.5 Valori limite

La Commissione Europea ha indicato i seguenti limiti riferiti ad una media annuale: 400 Bq/m³ per gli edifici esistenti e 200 Bq/m³ per le nuove costruzioni. Il D.Lgs 241/00 sottolinea come esista l'obbligo di intervenire con tecniche di bonifica appropriate quando la concentrazione supera i 500 Bq/m³. (Raisa, et al., 2010 p. 53)

1.2.1.6 Dati di rilevazione

Alcune ricerche condotte nei paesi europei hanno dimostrato concentrazioni medie di radon intorno ai 60 Bq/m³ in linea con la media mondiale che si attesta sui 40 Bq/m³ (Raisa, et al., 2010 p. 54). Una recente indagine ad opera dell'Istituto Superiore della Sanità ha rilevato una concentrazione media nelle abitazioni pari a 77 Bq/m³, con punte di 117 Bq/m³ nelle abitazioni lombarde.

1.2.2 Amianto

Negli anni passati l'amianto è stato ampiamente usato nel campo dell'edilizia, per le sue caratteristiche chimiche e meccaniche e per il notevole isolamento termico e acustico: nelle coperture, come materiale spruzzato per il rivestimento di strutture metalliche, negli intonaci, ecc.

1.2.2.1 Effetti sulla salute

All'inizio degli anni '90 sono stati riconosciuti a livello legislativo i rischi per la salute derivanti dal suo utilizzo introducendo norme per la sua limitazione e con la legge 257/1992 l'Italia ha bandito la sua estrazione e l'utilizzazione per produrre manufatti.

I materiali friabili costituiscono il pericolo maggiore, in quanto si possono ridurre in polvere con la semplice azione manuale e liberare fibre spontaneamente. L'amianto compatto invece non libera fibre in maniera spontanea ma risulta pericolo solo se abraso o segato.

Gli effetti sulla salute sono dovuti alla sottigliezza delle particelle fibrose che si liberano e che, se inalate, possono raggiungere gli alveoli polmonari. L'esposizione alle fibre di amianto è associata a malattie dell'apparato respiratorio, in particolare asbestosi, carcinoma polmonare e mesotelioma, una rara neoplasia della pleura direttamente collegata all'esposizione all'amianto. Per questo IARC ha classificato l'amianto nel gruppo 1, sostanza cancerogena per l'uomo.

1.2.2.2 Dati di rilevazione

Le concentrazioni esterne di amianto variano tra 0,1 e 4 fibre/litro, mentre negli edifici con presenza di amianto variano tra 1 e 10 fibre/litro nei casi migliori e tra 50 e 200 fibre/litro nei casi peggiori. (Artusi, 2000)

1.3 Inquinanti biologici

1.3.1 Bioeffluenti

Il processo metabolico degli occupanti di un ambiente richiede ossigeno e produce i cosiddetti bioeffluenti, composti da anidride carbonica (in maggiore quantità), umidità, aldeidi, esteri ed alcoli.

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

1.3.2 Muffe

Si rimanda al Capitolo III per una descrizione dettagliata.

1.3.3 Batteri e virus

I batteri (o germi) rappresentano all'incirca un terzo di tutti gli organismi viventi nell'aria. Sono suddivisi in due categorie: i gram-negativi e i gram-positivi. I primi producono l'endotossina, una sostanza infiammatoria associata a patologie tipiche dell'inquinamento indoor. I batteri gram-positivi invece comprendono diverse specie come i *Stafilococchi* e i *Micrococchi*, il cui vettore principale è l'uomo.

Tra i batteri più diffusi negli spazi confinati ricordiamo (anche se generalmente più frequente negli ambienti del terziario) la *Legionella Pneumophila* la quale prolifera in ambienti umidi e caldi e può provocare la febbre di Pontiac o la malattia del legionario.

La trasmissione di malattie infettive può avvenire per contatto diretto tra soggetti o attraverso l'aria, veicolo di molti batteri che si possono riprodurre e diffondere negli impianti di condizionamento dell'aria se non adeguatamente controllati e puliti.

1.3.4 Allergeni

I principali allergeni indoor sono rappresentati dagli acari, dagli animali domestici e dai pollini provenienti dall'esterno.

Gli *acari* di per sé non sono allergeni, ma lo sono le loro feci (di dimensioni circa pari a 25 µm) che, liberandosi nell'aria, possono essere inalate ed entrare a contatto con apparati sensibili. La crescita e la proliferazione degli acari è favorita da particolari condizioni ambientali: l'elevata umidità (70-80%) dell'aria e delle murature e una temperatura che si aggira tra i 22 e i 25 °C. Il numero di acari può raggiungere anche i 1000 per grammo di polvere, soprattutto nei tessuti imbottiti, tappeti e moquette.

I principali effetti sulla salute sono le classiche sintomatologie allergiche fino a patologie respiratorie (asma), anche se rimane difficile da quantificare esattamente gli effetti degli acari sull'incidenza dell'asma.

Gli *allergeni* prodotti dagli animali domestici sono presenti nella pelliccia, nella forfora, nella saliva e nell'urina. Il principale allergene del gatto (Fel d I) è contenuto nella forfora ed è composto da particelle di diametro variabile tra 1-10 µm. Nelle case dove vi è almeno un gatto la concentrazione di allergeni nell'aria varia da 20 a 1140 ng/m³.

Il principale allergene del cane è denominato Can f I e all'interno delle case dove sono presenti dei cani la concentrazione supera i 10 µg per grammo di polvere.

Gli allergeni prodotti dagli animali domestici sono facilmente trasportabili dall'aria e dalle persone tramite gli indumenti perciò si diffondono anche in ambienti in cui solitamente gli animali non sono presenti. (Ministero della Salute, 2001)

Nei soggetti allergici questi allergeni possono indurre difficoltà nella respirazione, tosse, starnuti, prurito agli occhi, eczemi, riniti e in qualche caso asma.

I *pollini* sono contaminanti biologici facilmente trasportabili attraverso l'aria e possono entrare negli ambienti confinati attraverso le porte, finestre e fessure oppure depositandosi sugli indumenti. L'effetto sanitario principale è l'allergia che si manifesta quando la concentrazione di polline raggiunge una determinata soglia; in Italia il periodo maggiore di sviluppo e trasporto dei pollini è la primavera durante la quale i soggetti sensibili e/o allergici possono manifestare starnuti, riniti e congiuntivite.

Fondamentale risulta quindi il controllo e la filtrazione dell'aria in ingresso negli ambienti domestici al fine di ridurre quanto possibile l'entrata di tali inquinanti.

1.4 Qualità dell'aria esterna

La qualità dell'aria esterna è un parametro fondamentale per lo studio della ventilazione negli edifici; infatti per rinnovare l'aria interna si utilizza aria proveniente dall'esterno che contiene molti inquinanti i quali possono contribuire ad una scarsa qualità dell'aria negli ambienti interni.

Un primo passo consiste quindi nel conoscere i livelli di contaminazione dell'aria esterna per decidere se è necessaria o meno una filtrazione prima dell'immissione negli ambienti. Una idonea filtrazione dell'aria è facilmente realizzabile in sistemi di tipo meccanico, ma impossibile quando il ricambio d'aria avviene tramite la semplice apertura dei serramenti. La presenza di inquinanti nell'aria esterna è un fattore molto importante per la salute umana e anche per questo sono stati introdotti valori limite di concentrazione per ognuno di questi contaminanti.

Una prima classificazione dell'aria esterna è riportata nella Tabella 1-4 tratta dal prospetto 4 della norma UNI EN 13779 che però non si occupa di ventilazione in campo residenziale.

Categoria	Descrizione
ODA 1	Aria pura che può presentare polveri occasionali (per esempio pollini)
ODA 2	Aria esterna con alte concentrazioni di sostanza particolata e/o altri inquinanti gassosi
ODA 3	Aria esterna con altissime concentrazioni di sostanza particolata e/o altri inquinanti gassosi

Tabella 1-4 - Classificazione dell'aria esterna (ODA) secondo UNI EN 13779

La normativa riporta un approccio per applicare questa classificazione:

- ODA 1 si applica dove le linee guida WHO o altre norme o regolamentazioni nazionali riguardanti l'aria esterna sono soddisfatte.
- ODA 2 si applica dove le concentrazioni di inquinamento eccedono le linee guida WHO o qualsiasi norma o regolamentazione sulla qualità dell'aria esterna di un fattore sino a 1,5

- ODA 3 si applica dove le concentrazioni di inquinamento eccedono le linee guida WHO o qualsiasi norma o regolamentazione sulla qualità dell'aria esterna di un fattore maggiore di 1,5

Dato che a livello nazionale non sono presenti direttive relative a tutti gli inquinanti, viene richiesto al progettista una interpretazione chiara della norma, tenendo conto anche della presenza simultanea di più inquinanti.

La procedura di classificazione dell'aria esterna può essere così condotta:

- Si acquisiscono i valori di concentrazione dei diversi inquinanti per l'ubicazione considerata
- Si confronta la concentrazione di ogni inquinante con il rispettivo valore guida, valutandone il rapporto
- Si verifica se tale rapporto è inferiore a 1, compreso tra 1 e 1,5 o superiore a 1,5
- Il valore più alto tra quelli così identificati individua la classe ODA

In fase di progettazione è importante quindi avvalersi di dati sullo stato di inquinamento atmosferico del sito; a livello nazionale sono importanti i documenti redatti dalle Agenzie Regionali per la Protezione Ambientale (ARPA) che vengono periodicamente aggiornati con campagne di misurazione.

La direttiva europea 2008/50/CE, recepita in Italia con il D.Lgs. 155/2010 e successive modifiche, rappresenta il nuovo riferimento per individuare i limiti di alcuni inquinanti dell'aria esterna, riportati nell'allegato XI. Fornisce inoltre alcune definizioni importanti:

- Inquinante: qualsiasi sostanza presente nell'aria ambiente e che può avere effetti nocivi per la salute umana e/o per l'ambiente nel suo complesso
- Livello: Concentrazione nell'aria ambiente di un inquinante o deposizione dello stesso su una superficie in un dato periodo di tempo
- Valore limite: livello di concentrazione fissato in base alle conoscenze scientifiche al fine di evitare, prevenire o ridurre gli effetti nocivi per la salute umana e/o per l'ambiente nel suo complesso; esso deve essere raggiunto entro un termine prestabilito e in seguito non deve essere superato.
- Soglia di allarme: livello oltre il quale vi è un rischio per la salute umana, in caso di esposizione di breve durata della popolazione nel suo insieme e raggiunto il quale gli Stati membri devono adottare provvedimenti immediati

In Tabella 1-5 sono riportati i principali inquinanti dell'aria esterna, con relative fonti e rischi per la salute.

Inquinante	Fonte principale	Principali effetti per la salute
Benzene	Veicoli a motore Industria chimica	Cancro Incidenza sul sistema nervoso centrale
Metalli pesanti (ad esempio arsenico, cadmio, piombo, mercurio e nickel)	Processi industriali Produzione di energia Veicoli a motore	Cancro Problemi digestivi Danni al sistema nervoso
Biossido di azoto	Veicoli a motore Altri processi di combustione	Malattie respiratorie Danni ai tessuti polmonari
Ozono	Trasformazione di ossidi di azoto e di composti organici volatili prodotti dal traffico in presenza di luce solare	Problemi respiratori Menomazione della funzione dei polmoni Peggioramento dell'asma Irritazione degli occhi e del naso Minore resistenza alle infezioni
Particelle	Combustione, ad esempio gasolio e legno Agricoltura, ad esempio: aratura, bruciatura per disporre di superfici coltivabili Reazioni chimiche secondarie	Cancro Problemi cardiaci Malattie respiratorie Aumento del rischio di mortalità infantile
Biossido di zolfo	Combustione del combustibile	Problemi respiratori

Tabella 1-5 - Principali inquinanti dell'aria esterna (Arpa Emilia Romagna, 2013)

Si riporta in Tabella 1-6 un resoconto sui valori limite forniti dalle varie linee guida e direttive in vigore per i principali inquinanti dell'aria esterna.

INQUINANTE	PERIODO DI MEDIAZIONE	VALORE LIMITE	MARGINE DI TOLLERANZA	FONTE
Biossido di zolfo SO ₂	10 min	500 µg/m ³	-	WHO 2005
	1 h	350 µg/m ³ da non superare più di 24 volte per anno civile	150 µg/m ³ (43%)	Direttiva 2008/50/CE D.Lgs 155/2010
	24 h	20 µg/m ³	-	WHO 2005
	1 anno civile	125 µg/m ³ da non superare più di 3 volte per anno civile 50 µg/m ³ 200 µg/m ³	-	Direttiva 2008/50/CE D.Lgs 155/2010 WHO 1999 WHO 2005
Biossido di azoto NO ₂	1 h	200 µg/m ³ da non superare più di 18 volte per anno civile	50% al luglio 1999, con una riduzione dal 1 gennaio 2001 e successivamente ogni 12 mesi secondo una percentuale costante annua fino a raggiungere lo 0% entro il 1 gennaio 2010	Direttiva 2008/50/CE D.Lgs 155/2010
	1 anno civile	40 µg/m ³	-	WHO 2005
Ozono O ₃	1 anno civile	40 µg/m ³	50% al luglio 1999, con una riduzione dal 1 gennaio 2001 e successivamente ogni 12 mesi secondo una percentuale costante annua fino a raggiungere lo 0% entro il 1 gennaio 2012	Direttiva 2008/50/CE D.Lgs 155/2010
	8 h	100 µg/m ³ 120 µg/m ³	-	WHO 2005
Benzene	Media massima giornaliera calcolata su 8 h	5 µg/m ³	5 µg/m ³ (100%) al 13 dicembre 2000 con una riduzione dal 1 gennaio 2006 e successivamente ogni 12 mesi di 1 µg/m ³ fino a raggiungere lo 0% entro il 1 gennaio 2010	Direttiva 2008/50/CE D.Lgs 155/2010
	1 anno civile	10 µg/m ³ 0,5 µg/m ³	60% 100%	Direttiva 2008/50/CE D.Lgs 155/2010 D.Lgs 155/2010
Monossido di carbonio CO	Media massima giornaliera calcolata su 8 h	25 µg/m ³ 10 µg/m ³	-	WHO 2005
Piombo	1 anno civile	50 µg/m ³ da non superare più di 35 volte per anno civile	50%	Direttiva 2008/50/CE D.Lgs 155/2010
PM _{2,5}	24 h	40 µg/m ³	20%	Direttiva 2008/50/CE D.Lgs 155/2010
	1 anno civile	10 µg/m ³	-	WHO 2005
PM ₁₀	24 h	50 µg/m ³ da non superare più di 35 volte per anno civile	50%	Direttiva 2008/50/CE D.Lgs 155/2010
	1 anno civile	40 µg/m ³	20%	Direttiva 2008/50/CE D.Lgs 155/2010

Tabella 1-6 - Valori limite per i principali inquinanti dell'aria esterna

1.5 Qualità dell'aria interna

Lo Standard ASHRAE 62.1:2010 definisce come qualità dell'aria interna accettabile quella in cui *“non vi sono contaminanti noti a concentrazioni nocive così come stabilito dalle autorità competenti e dove la sostanziale maggioranza (80% o più) delle persone non è insoddisfatta dell'aria a cui è esposta”*

Per la norma UNI 10339:1995, la qualità dell'aria è *“una caratteristica dell'aria trattata che risponde ai requisiti di purezza. Essa non contiene contaminanti noti in concentrazioni tali da arrecare danno alla salute e causare condizioni di malessere per gli occupanti”*. La revisione di questa norma (si veda il Capitolo III) si adegua alla definizione dello standard americano, basato sulla teoria di Fanger.

In entrambe le definizioni compaiono criteri oggettivi (concentrazioni di inquinanti) e soggettivi (malessere o insoddisfazione delle persone negli ambienti). Ciò significa che, oltre al rischio sanitario dovuto all'esposizione ad inquinanti in un ambiente insalubre, esiste anche un aspetto qualitativo legato alla percezione olfattiva, pur senza avere implicazioni di carattere sanitario.

Come per l'aria esterna, anche per l'aria interna (IDA) la norma UNI EN 13779 indica una classificazione secondo quattro categorie. (Tabella 1-7)

Categoria	Descrizione
IDA 1	Alta qualità dell'aria interna
IDA 2	Media qualità dell'aria interna
IDA 3	Modesta qualità dell'aria interna
IDA 4	Bassa qualità dell'aria interna

Tabella 1-7 - Classificazione dell'aria interna (IDA) secondo UNI EN 13779

Nelle abitazioni i principali inquinanti sono generati dalla presenza delle persone (vapore, bioeffluenti, CO₂, ecc.), dalle loro attività (cottura dei cibi, igiene personale, ecc.), dai materiali presenti all'interno dell'edificio e dai processi di combustione per il riscaldamento e la produzione di acqua calda sanitaria. In Tabella 1-8 sono riassunti i principali tipi e fonti di inquinamento prodotti all'interno degli edifici.

Inoltre risulta più semplice prevedere le portate per diluire gli inquinanti quando sono connessi alla presenza di persone, anche se sono emessi con discontinuità nell'arco della giornata, rispetto a quelli collegati all'edificio, che sono emessi invece con continuità.

Persone	CO ₂ , Microorganismi
Fumo di tabacco	PM ₁₀ , CO, VOC, IPA
Apparecchi per uffici	VOC, O ₃
Apparecchi di cottura	NO _x , CO, VOC
Forni a legna e camini	PM ₁₀ , CO, IPA
Riscaldamento a gas	NO _x , CO
Riscaldamento a kerosene	NO _x , CO, SO _x
Prodotti per la pulizia	VOC
Materiali edilizi	VOC, Radon, Formaldeide, Amianto, Microorganismi
Terreno	Radon
Arredi	VOC, Formaldeide, Microorganismi
Impianti di condizionamento	Microorganismi

Tabella 1-8 - Principali tipi e fonti di inquinanti nell'aria interna

A titolo informativo si riporta, in Tabella 1-9, un riassunto dei principali contaminanti *indoor* con le rispettive linee guida. L'aria degli ambienti interni è quindi caratterizzata da una varietà di fonti e inquinanti, le cui concentrazioni sono variabili nel tempo in relazione a diversi fattori (tassi di ventilazione, temperature, umidità, ecc).

Sotto queste condizioni, secondo la pratica corrente si assume che se l'inquinante con concentrazione maggiore (nelle abitazioni anidride carbonica e/o vapore acqueo), ovvero il principale (*key pollutant*), è adeguatamente controllato allora anche tutti gli altri contaminanti lo sono automaticamente. (secondo quanto indicato dalla CEN TR 14788:2006, si rimanda al Capitolo III)

Pollutant	Critical outcome(s) for guideline definition	Guidelines	Comments
Benzene	<ul style="list-style-type: none"> Acute myeloid leukaemia (sufficient evidence on causality) Genotoxicity 	<ul style="list-style-type: none"> No safe level of exposure can be recommended Unit risk of leukaemia per 1 µg/m³ air concentration is 6×10^{-4} The concentrations of airborne benzene associated with an excess lifetime risk of 1/10 000, 1/100 000 and 1/1 000 000 are 17, 1.7 and 0.17 µg/m³, respectively 	
Carbon monoxide	Acute exposure-related reduction of exercise tolerance and increase in symptoms of ischaemic heart disease (e.g. ST-segment changes)	<ul style="list-style-type: none"> 15 minutes – 100 mg/m³ 1 hour – 35 mg/m³ 8 hours – 10 mg/m³ 24 hours – 7 mg/m³ 	
Formaldehyde	Sensory irritation	0.1 mg/m ³ – 30-minute average	The guideline (valid for any 30-minute period) will also prevent effects on lung function as well as nasopharyngeal cancer and myeloid leukaemia
Naphthalene	Respiratory tract lesions leading to inflammation and malignancy in animal studies	0.01 mg/m ³ – annual average	The long-term guideline is also assumed to prevent potential malignant effects in the airways
Nitrogen dioxide	Respiratory symptoms, bronchoconstriction, increased bronchial reactivity, airway inflammation and decreases in immune defence, leading to increased susceptibility to respiratory infection	<ul style="list-style-type: none"> 200 µg/m³ – 1 hour average 40 µg/m³ – annual average 	No evidence for exposure threshold from epidemiological studies
Polycyclic aromatic hydrocarbons	Lung cancer	<ul style="list-style-type: none"> No threshold can be determined and all indoor exposures are considered relevant to health Unit risk for lung cancer for PAH mixtures is estimated to be 8.7×10^{-5} per ng/m³ of B[a]P The corresponding concentrations for lifetime exposure to B[a]P producing excess lifetime cancer risks of 1/10 000, 1/100 000 and 1/1 000 000 are approximately 1.2, 0.12 and 0.012 ng/m³, respectively 	B[a]P is taken as a marker of the PAH mixture
Radon	Lung cancer Suggestive evidence of an association with other cancers, in particular leukaemia and cancers of the extrathoracic airways	<ul style="list-style-type: none"> The excess lifetime risk of death from radon-induced lung cancer (by the age of 75 years) is estimated to be 0.6×10^{-2} per Bq/m³ for lifelong non-smokers and 15×10^{-2} per Bq/m³ for current smokers (15–24 cigarettes per day); among ex-smokers, the risk is intermediate, depending on time since smoking cessation The radon concentrations associated with an excess lifetime risk of 1/100 and 1/1000 are 67 and 6.7 Bq/m³ for current smokers and 1670 and 167 Bq/m³ for lifelong non-smokers, respectively 	WHO guidelines provide a comprehensive approach to the management of health risk related to radon
Trichloroethylene	Carcinogenicity (liver, kidney, bile duct and non-Hodgkin's lymphoma), with the assumption of genotoxicity	<ul style="list-style-type: none"> Unit risk estimate of 4.3×10^{-7} per µg/m³ The concentrations of airborne trichloroethylene associated with an excess lifetime cancer risk of 1:10 000, 1:100 000 and 1:1 000 000 are 230, 23 and 2.3 µg/m³, respectively 	
Tetrachloroethylene	Effects in the kidney indicative of early renal disease and impaired performance	0.25 mg/m ³ – annual average	Carcinogenicity is not used as an endpoint as there are no indications that tetrachloroethylene is genotoxic and there is uncertainty about the epidemiological evidence and the relevance to humans of the animal carcinogenicity data

Tabella 1-9 - Linee guida per i principali inquinanti indoor (WHO Europe, 2010)

1.6 Effetti sulla salute

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

Capita inoltre che numerosi effetti si manifestino grazie ad una contemporanea presenza di stress, pressioni lavorative, discomfort di origine stagionale, senza contare che la risposta degli individui ad una stessa esposizione ad un inquinante ambientale può comunque variare a seconda di varie condizioni individuali intrinseche (come sesso, età, grado di reattività delle vie respiratorie)

I principali effetti sull'uomo si suddividono in:

- Effetti respiratori (asma, allergie, bronchiti, infezioni)
- Effetti sul sistema nervoso (emicranie)
- Effetti irritativi su cute e mucose (laringiti, congiuntiviti, eritemi)
- Effetti genotossici (alterazione delle cellule, cancro)
- Effetti sensoriali (bruciore alla gola, lacrimazione, effetti neuropsichici)
- Effetti sul sistema riproduttivo cardiovascolare, gastrointestinale

E' altresì opportuno differenziare tra quelle che sono le vere malattie correlate all'edificio (febbre da umidificatore, legionellosi, tumore dovuto al radon, ecc.) indicate con la sigla BRI (*Building Related Illness*) e l'insieme di sintomi (mal di testa, difficoltà di concentrazione, irritazione degli occhi, senso di malessere generale) che colpiscono un numero significativo (di solito più del 20%) di persone che soggiornano in alcuni edifici e che spariscono una volta abbandonato l'edificio: si tratta della cosiddetta SBS (*Sick building syndrome*).

L'Organizzazione Mondiale della Sanità (WHO) definisce la SBS come "una reazione al microclima che colpisce la maggior parte degli occupanti e che non può essere correlata con una causa evidente, quale un'eccessiva esposizione a un singolo agente o un difetto del sistema di ventilazione".

Tra le cause possibili che provocano la SBS troviamo:

- ventilazione degli spazi insufficiente:
- presenza di inquinanti chimici

- da fonti interne:
 - adesivi, rivestimenti, mobili, macchine fotocopiatrici, insetticidi e detersivi che emettono diversi tipi di VOC;
 - CO, NO_x e particolato aerodisperso sono prodotti da stufe a gas o cherosene e sono presenti nel fumo di sigaretta;
- da fonti esterne:
 - gas di scarico delle auto
 - aria viziata espulsa da altri impianti.
- presenza di inquinanti biologici:
 - batteri, muffe, pollini, virus

Questi fattori possono combinarsi con altri, come particolari condizioni non idonee di temperatura, umidità, affollamento, illuminazione e rumorosità tali da generare una diminuzione del comfort ambientale e un rischio per la salute.

Numerosi studi sono stati effettuati su questo argomento, evidenziando un legame tra esposizione all'interno degli ambienti e salute.

In particolare uno studio norvegese del 1999 (Oie, et al., 1999) mostra come con un tasso di ricambio dell'aria inferiore a 0,5 h⁻¹ cresce il rischio di ostruzione bronchiale dovuta agli inquinanti presenti negli ambienti confinati.

In Canada, invece, alcuni ricercatori hanno verificato, su un campione di 49 residenze, che le infezioni respiratorie sono evidentemente correlate al livello medio di CO₂ presente negli ambienti interni. (Kovesi, et al., 2007)

Il risultato comune a cui si è giunti in tutti gli studi realizzati fino ad oggi è che un basso tasso di ventilazione accentua gli effetti degli inquinanti dell'aria all'interno delle abitazioni.

2 CONTESTO LEGISLATIVO E NORMATIVO DELLA VENTILAZIONE

Nei paragrafi seguenti vengono trattati i principali riferimenti normativi e legislativi sul tema della ventilazione. Partendo dalle disposizioni europee, recepite a livello nazionale, vengono analizzate, oltre alle varie normative tecniche, anche a quelle americane che, sebbene riferite ad un contesto differente da quello italiano, rappresentano un autorevole supporto.

Tali strumenti purtroppo, non sono sempre facilmente sovrapponibili tra loro e non trovano facile applicabilità; ciò poiché l'Italia, a differenza di altri paesi comunitari, avendo sempre trascurato l'importante aspetto della ventilazione negli ambienti, si trova in un caso particolare di carenza e difformità legislativa.

2.1 La legislazione comunitaria

La Comunità Europea ha emanato nel 2002 la Direttiva 91 dal titolo “*Energy Performance of Buildings Directive (EPBD)*”. Essa nasce per promuovere una maggiore efficienza energetica in edilizia e focalizza l'importanza del raggiungimento di un'elevata qualità ambientale anche grazie al controllo della ventilazione, dell'umidità e della purezza dell'aria. Per la piena applicazione dell'EPBD il CEN (Comitato Europeo di Normazione) ha predisposto 31 norme, delle quali 7 si occupano di ventilazione nell'edilizia, tra cui la UNI EN 15242 e la UNI EN 15251, in seguito descritte.

La Direttiva 2010/31/UE (*EPBD 2*) modifica i contenuti della Direttiva del 2002, rafforzando la necessità di aumentare l'efficienza energetica dell'Unione Europea per conseguire l'obiettivo di ridurre del 20% il consumo energetico entro il 2020.

2.2 La legislazione in Italia

La direttiva EPBD doveva essere recepita da tutti gli Stati membri della Comunità Europea; il primo documento emanato in Italia è stato il D.Lgs. 192/05, ampliato e aggiornato dopo un anno dal D.Lgs. 311/06.

Dal 4 agosto 2013 è in vigore la Legge 90/2013, di conversione con modificazioni del D.L. 63/2013: il provvedimento recepisce la Direttiva 2010/31/UE, dettando le nuove regole sulla prestazione energetica degli edifici nuovi e di quelli oggetto di notevoli ristrutturazioni, aggiornando il D.Lgs. 192/2005. Sono confermate le proroghe al 31 dicembre 2013 delle detrazioni del 65% per interventi di riqualificazione energetica degli edifici e del 50% per le ristrutturazioni edilizie.

2.2.1 Il D.Lgs. 192/2005 e s.m.i.

In questo decreto, recante il titolo *“Attuazione della direttiva 2002/91/CE relativa al rendimento energetico nell’edilizia”* la ventilazione non è trattata in maniera specifica (non compare nemmeno nella serie di definizioni all’allegato A) ma è presente implicitamente in altre considerazioni, come la limitazione della formazione di condensa e di proliferazione di muffe.

L’allegato E *“Relazione tecnica di cui all’articolo 28 della legge 9 gennaio 1991, n. 10, attestante la rispondenza alle prescrizioni in materia di contenimento del consumo energetico degli edifici”* al punto 5 richiede al progettista di compilare alcuni dati relativi agli impianti termici, descrivendo eventuali sistemi di ventilazione forzata; come anche alcuni autori sottolineano (Raisa, et al., 2010) sarebbe forse stato più opportuno richiedere semplicemente una descrizione del sistema di ventilazione adottato.

Alla lettera a) del punto 6 *“Principali risultati dei calcoli”*, che riguarda l’involucro edilizio e i ricambi d’aria, è richiesto al progettista di indicare la classe di permeabilità all’aria dei serramenti esterni (senza fare cenno però ad un calcolo delle portate per infiltrazione), il numero di ricambi orari come media nelle 24 ore e la portata di ricambio G solo nei casi di ventilazione meccanica.

Nella prassi progettuale è però consuetudine errata dichiarare un ricambio minimo convenzionale di $0,5 \text{ h}^{-1}$, retaggio delle modalità di compilazione della relazione ex Legge 10/91, senza prevedere un progetto del sistema di ventilazione.

Alla lettera c) del comma 9, allegato I (sostituito dall'art. 4 del D.P.R. 59/09 ma rimasto invariato e integrato) si identifica la ventilazione naturale come la tecnica migliore e da preferire, ma nel caso in cui non sia efficace, si suggerisce l'impiego di un sistema di ventilazione meccanica; questo deve avvenire rispettando il comma 13 dell'art. 5 del D.P.R. 412/93 che sottolinea l'adozione di un recuperatore di calore quando un impianto supera un determinato numero annuo di ore di funzionamento.

All'interno del D.Lgs. 311 non sono quindi definiti valori convenzionali per il ricambio d'aria negli edifici residenziali, diversamente da quanto accadeva nel D.P.R. 412/1993.

Il D.P.R. 59/09 impone di fare riferimento, per il calcolo dei fabbisogni dell'edificio e quindi per la certificazione energetica al corpo normativo delle UNI TS 11300, in seguito analizzate.

Anche alla luce delle successive modifiche e integrazioni al D.Lgs. 192/2005 è evidente come questo presenti ancora numerose lacune sul tema della ventilazione, andando in pratica a disattendere i requisiti definiti dalla EPBD.

2.2.2 I Regolamenti comunali

A livello comunale sono emanati i Regolamenti Edilizi e i Regolamenti Urbanistici Edilizi (RUE) con valore cogente; hanno quindi la priorità su qualsiasi altra disposizione. In questa trattazione si riporta a titolo di esempio le indicazioni contenute nel RUE della città di Bologna. In particolare l'art. 56 sottolinea come *“Al fine di garantire adeguate condizioni d'igiene, salubrità e benessere ambientale, la ventilazione degli spazi chiusi costituisce condizione essenziale per il mantenimento dell'equilibrio omeostatico dell'uomo.”*

Il regolamento cita poi le prestazioni relative alla ventilazione:

- a. Assicurare le condizioni di benessere respiratorio e olfattivo.
- b. Assicurare un adeguato ricambio d'aria, per evitare la presenza di impurità dell'aria e di gas nocivi.

- c. Assicurare un adeguato afflusso d'aria nei locali in cui sono installati apparecchi a combustione.
- d. Controllare il grado di umidità relativa, per garantire adeguati livelli di benessere igrotermico invernale, contenere gli effetti della condensa del vapore ed evitare la formazione di colonie microbiche.
- e. Adottare soluzioni che contribuiscano al raggiungimento di un sufficiente benessere igrotermico estivo.

La scheda tecnica di dettaglio dE4.9 allegata al Regolamento definisce i livelli prestazionali. In particolare l'art. 3.1 sottolinea come si debbano assolvere le condizioni seguenti, con la definizione di n numero di ricambi orari misurati in metri cubi d'aria.

I. Interventi di nuova costruzione con edificazione ex novo interventi di ristrutturazione globale:

a1) spazi per attività principale²

- presenza di superfici apribili tali da permettere ricambi discontinui in misura equivalente a quella necessaria al soddisfacimento del requisito della superficie illuminante;
- $n \geq 0,2 \text{ m}^3/\text{hm}^3$;
- in particolare per le cucine, comprese quelle in nicchia, o zona cottura: in aggiunta a quanto previsto per i locali della funzione principale, $n \geq 3 \text{ m}^3/\text{hm}^3$ (ricambio discontinuo) da ubicare in corrispondenza dei punti di cottura, con collegamento esterno tramite canna di esalazione;

a2) bagni, servizi igienici, docce, spogliatoi

- $n \geq 0,2 \text{ m}^3/\text{hm}^3$ se dotati di apertura all'esterno;
- $n \geq 5 \text{ m}^3/\text{hm}^3$ se non dotati di apertura all'esterno, assicurata da impianto di estrazione forzata (ricambi discontinui), temporizzato con comando automatico in modo da assicurare almeno 3 ricambi per ogni utilizzazione dell'ambiente;

² Il livello prestazionale prescritto di cui al punto a.1 si ritiene convenzionalmente soddisfatto quando le superfici ventilanti (aperture dirette sull'esterno) risultino non inferiore ad 1/8 per la nuova costruzione ed 1/16 per l'esistente, della superficie del pavimento.

- $n \geq 2 \text{ m}^3/\text{hm}^3$ se non dotati di apertura all'esterno, assicurati da estrazione continua attraverso ventilazione meccanica (questa condizione è obbligatoria per gli spogliatoi privi di aperture sull'esterno);
- prevedere idonei sistemi per il transito dell'aria aspirata;
- negli usi abitativi, con esclusione dei monocalci: garantire la presenza di almeno un servizio igienico dotato di apertura all'esterno; favorire il ricambio d'aria con adeguato riscontro di finestre collocate su pareti diverse;

a3) spazi di circolazione e collegamento ad uso comune

- $n \geq 0,2 \text{ m}^3/\text{hm}^3$;
- nelle scale: garantire i ricambi discontinui con la presenza di finestre apribili a ciascun piano di superficie non inferiore a 1/20 della superficie del vano; è ammessa la ventilazione dall'alto attraverso lucernari la cui apertura reale sia non inferiore a $\text{m}^2 0,40$ per ogni piano servito, compreso quello terreno; fatte salve le condizioni di sicurezza al fuoco, per vani scala privi di pareti confinanti con l'esterno dell'edificio, è ammessa la sola ventilazione meccanica, che assicuri un ricambio $n \geq 1 \text{ m}^3/\text{hm}^3$, temporizzata con immissione ed estrazione;

a4) spazi ad uso comune per attività collettive (ad es. sale condominiali)

- $n \geq 0,2 \text{ m}^3/\text{hm}^3$;
- ricambi discontinui $n \geq 5 \text{ m}^3/\text{hm}^3$;

a5) autorimesse di pertinenza dell'unità immobiliare

- come da specifica normativa.

a6) cantine e relativi corridoi

- nelle cantine: garantire la ventilazione direttamente dall'esterno oppure attraverso murature a gelosia da corridoi comuni ventilati direttamente;
- nei corridoi delle cantine: garantire la ventilazione direttamente dall'esterno, oppure direttamente dalle cantine aerate, oppure indirettamente con muri a gelosia verso il corridoio.

a7) specifiche ulteriori per gli spazi ad uso abitativo

- per gli alloggi al piano terra: garantire per almeno un vano principale affacci non prospettanti su percorsi pubblici o privati di uso pubblico, su portici, su androni e corridoi di uso comune e su chiostrine (questi affacci devono essere considerati affacci secondari);

- garantire il ricambio d'aria con adeguato riscontro di finestre collocate su pareti diverse (compresa l'eventuale apertura posta nel servizio igienico), con esclusione di monocali e bilocali;
- divieto di alloggi con sole aperture poste su piani verticali orientati esclusivamente a nord;

II. Interventi su edifici esistenti (diversi da quelli di ristrutturazione globale):

b1) norme generali

- nell'impossibilità di garantire, per vincoli oggettivi, i rapporti tra superficie delle aperture e superficie di pavimento previsti per le nuove costruzioni nemmeno intervenendo sul numero e sulla dimensione delle aperture, garantire una superficie ventilata apribile (ricambi discontinui) equivalente a quella necessaria al soddisfacimento del requisito di superficie illuminante del corrispondente uso per l'edilizia esistente;

b2) bagni e servizi igienici

- nei bagni privi di finestre, ove ammessi, garantire comunque una delle due seguenti soluzioni alternative: apertura con griglia su parete esterna della superficie di mq 0,20; ricambio meccanico discontinuo $n \geq 5 \text{ m}^3/\text{m}^3\text{h}$, temporizzato con immissione ed estrazione, o continuo $n \geq 2 \text{ m}^3/\text{hm}^3$; la soluzione ad aspirazione continua $n \geq 2 \text{ m}^3/\text{hm}^3$ è obbligatoria per gli spogliatoi privi di aperture sull'esterno;
- prevedere idonei sistemi per il transito dell'aria aspirata;

b3) spazi di circolazione e collegamento ad uso comune

- $n \geq 0,1 \text{ m}^3/\text{hm}^3$
- nelle scale: come da precedente punto a3.

2.3 Normativa tecnica

L'apparato normativo sulla ventilazione è molto ricco; in questa trattazione le diverse norme sono suddivise in base ai temi principali trattati.

2.3.1 Normative di supporto alla EPBD

È già stato sottolineato in precedenza che, per l'applicazione dell'EPBD, il CEN ha predisposto ben 31 norme, di cui 5 riguardanti la ventilazione nell'edilizia residenziale, di seguito descritte.

2.3.1.1 UNI EN 15251:2008

La norma, recante il titolo *“Criteri per la progettazione dell'ambiente interno e per la valutazione della prestazione energetica degli edifici, in relazione alla qualità dell'aria interna, all'ambiente termico, all'illuminazione e all'acustica”* è applicabile ad abitazioni individuali, condomini, uffici, scuole, ospedali, alberghi e ristoranti, impianti sportivi, edifici ad uso commerciale all'ingrosso e al dettaglio.

Viene presentato inizialmente il concetto di “categoria di qualità” dell'edificio e in Tabella 2-1 si riportano le descrizioni delle categorie e i requisiti ad esse connesse.

Categoria	Spiegazione
I	Alto livello di aspettativa; è raccomandata per spazi occupati da persone molto sensibili e fragili (come persone con handicap, ammalati, bambini molto piccoli o anziani) che hanno bisogno di requisiti specifici
II	Livello normale di aspettativa; dovrebbe essere utilizzata per le nuove costruzioni o per le ristrutturazioni
III	Un accettabile moderato livello di aspettativa; dovrebbe essere usata per gli edifici esistenti
IV	Valori al di fuori dei criteri delle precedenti categorie; questa categoria dovrebbe essere accettata solo per una limitata parte dell'anno

Tabella 2-1 - Descrizione delle categorie di qualità dell'edificio secondo UNI EN 15251:2008

Al punto 6.3 la norma si occupa della qualità dell'aria interna e dei tassi di ventilazione; in particolare al 6.3.2 si fa riferimento agli edifici residenziali, descrivendo le sorgenti di inquinanti possibili e sottolineando come i tassi di ventilazione possano essere espressi in diversi modi:

- in termini di ricambi orari per ambiente
- in tassi di immissione o in tassi di estrazione dai locali “umidi” (cucine e bagni)
- in termini di portate globali di aria di ricambio

Il punto 7.3.2.1 sottolinea che nelle residenze la ventilazione minima si intende costante e continuativa durante i momenti di occupazione degli spazi; si sottolinea anche il fatto che le residenze dovrebbero essere comunque ventilate anche durante i periodi di non occupazione, ma con portate di aria inferiori.

Il punto 7.3.2.2 si occupa della ventilazione naturale degli edifici residenziali; anche qui si evidenzia il fatto che le residenze andrebbero ventilate anche quando non sono occupate e si rimanda alla UNI EN 15242:2008 per il calcolo delle portate di rinnovo.

Nel caso, come quello italiano, in cui non vi siano disponibili informazioni a livello nazionale, si può fare riferimento alla appendice B, intitolata “*Basis for the criteria for indoor air quality and ventilation rates*”.

Essa indica i valori raccomandati per la progettazione dei sistemi di ventilazione. Il punto B.2 riguarda gli edifici residenziali e specifica che la ventilazione si deve basare su:

- Estrazione dalle “*wet rooms*” ossia dalle cucine e bagni, dove avviene la maggior produzione di vapore acqueo e di odori
- Ricambio generale d'aria in tutto l'alloggio
- Immissione di aria nuova nei locali principali (soggiorni e stanze da letto)

In Tabella 2-2 sono indicate le portate d'aria e i tassi di ventilazione³ per gli ambienti residenziali in condizioni di perfetto miscelamento e funzionamento continuo durante i periodi di occupazione, ai fini del raggiungimento di una idonea qualità dell'aria.

³ Il parametro di progetto più corretto è la portata d'aria perché è questa che governa la qualità dell'aria, mentre il tasso di ricambio non è altro che una conseguenza della portata stessa con utilità comparativa.

Categoria	Portate d'aria e tassi di ricambio ^a		Soggiorni, stanze da letto. Portate di aria esterna		Portate di estrazione dell'aria (l/s)		
	l/s m ² (1)	h ⁻¹	l/s pers ^b (2)	l/s m ² (3)	Cucine (4a)	Bagni (4b)	Servizi igienici (4c)
I	0,49	0,7 (0,65)	10	1,4	28	20	14
II	0,42	0,6 (0,56)	7	1	20	15	10
III	0,35	0,5 (0,47)	4	0,6	14	10	7

Note:

a) Le portate espresse in l/s m² e i tassi di ricambio espressi in h⁻¹ sono qui valutati per un'altezza di ambiente pari a 2,5 m, caratteristica dei paesi del Nord Europa. Tra parentesi sono riportati i tassi di ricambio riferiti ad un'altezza di 2,7 m.

b) Il numero di occupanti in un edificio residenziale può essere stimato dal numero di camere da letto; devono essere usate le assunzioni effettuate a livello nazionale, se esistenti

Tabella 2-2 - Portate d'aria e tassi di ventilazione per le residenze secondo UNI EN 15251:2008

Nella tabella si opera una distinzione tra bagni e i servizi igienici, dove per bagno si intende il luogo in cui trovano spazio la doccia e il lavandino e per servizi igienici il luogo dove si trova il wc. Questa distinzione non è comune in Italia, mentre è frequente la configurazione di stanza da bagno con lavandino, bidet, vasca o doccia e wc, per il bagno principale, e la configurazione di locale con wc e lavandino per il bagno secondario. Alcuni autori (Raisa, et al., 2010) suggeriscono di utilizzare i valori corrispondenti ai bagni per il bagno principale e per i bagni secondari la colonna relativa ai servizi igienici. La norma specifica poi che, quando i valori di ogni specifica categoria in tabella conducono a differenti valori di ventilazione in rapporto al numero di occupanti, alla superficie in pianta e al numero di locali cucina, bagni e servizi igienici, deve essere seguito il seguente procedimento:

- 1) Calcolare la portata totale di ventilazione per l'abitazione sulla base di:
 - a) Superficie in pianta dell'abitazione, secondo la colonna (1)
 - b) Numero di persone o numero di camere, colonne (2) e (3)
- 2) Selezionare il valore più alto tra quelli ottenuti al punto 1) per la ventilazione totale dell'abitazione
- 3) Adeguare il tasso di estrazione dai servizi in accordo con le colonne (4a,4b,4c)

Quest'ultimo punto della norma (3) è abbastanza vago per il termine “*adjust*” (adeguare); esso lascia intendere che vi sono diverse possibilità di definire l'assetto globale del sistema. Le portate delle colonne 4a, 4b e 4c sono state stabilite per rimuovere gli inquinanti quando vengono generati. Se il bagno o la cucina non vengono utilizzati in continuazione non è necessario estrarre continuamente quelle portate, ma per il

dimensionamento dei componenti dell'impianto, come bocchette e condotti, bisognerà tenerne certamente conto.

Il punto B.4 infine si occupa di definire la ventilazione raccomandata durante i periodi di non occupazione da parte delle persone. Per gli edifici residenziali, durante questi periodi, deve essere comunque garantito un tasso di ventilazione minimo variabile tra 0,05 e 0,1 l/sm² nel caso in cui non vengano forniti altri valori a livello nazionale.

2.3.1.2 UNI EN 15239:2008 e UNI EN 15240:2008

Entrambe le norme descrivono una metodologia per l'ispezione degli impianti: la 15239, applicabile a edifici residenziali e non, riguarda i sistemi di ventilazione meccanica e include alcune raccomandazioni per apportare miglioramenti ai sistemi stessi. Al paragrafo 4.2 si sottolinea come l'apertura manuale dei serramenti, in un edificio riscaldato, faccia disperdere energia per "riscaldare le strade". La norma 15240 tratta invece l'ispezione degli impianti di climatizzazione presenti negli edifici per riscaldare o raffrescare i locali.

2.3.1.3 UNI EN 15242:2008

La norma (*"Metodi di calcolo per la determinazione delle portate d'aria negli edifici, comprese le infiltrazioni"*) descrive il metodo per calcolare le portate di aria di ventilazione per edifici da utilizzarsi per applicazioni come i calcoli energetici, il calcolo dei carichi termici, il benessere estivo e la valutazione della qualità dell'aria negli ambienti interni.

La metodologia si applica a edifici ventilati meccanicamente, sistemi ibridi e apertura delle finestre per mezzo di operazione manuale per l'aerazione o per il raggiungimento del comfort in estate. Al punto 3.14 viene fornita la definizione di *efficienza di ventilazione*, descritta come la relazione tra le concentrazioni di inquinamento nell'aria di apporto, nell'aria estratta e nell'aria interna nella zona di respirazione (nella zona occupata) e viene espressa da:

$$\varepsilon_v = \frac{c_{ETA} - c_{SUP}}{c_{IDA} - c_{SUP}}$$

dove:

ε_v = efficienza di ventilazione

c_{ETA} = concentrazione di inquinamento nell'aria estratta

c_{IDA} = concentrazione di inquinamento nell'aria interna (zona di respirazione nella zona occupata)

c_{SUP} = concentrazione di inquinamento nell'aria di apporto

La nota 1 sottolinea come l'efficienza di ventilazione dipenda dalla distribuzione dell'aria, dal tipo e dalla locazione delle fonti di inquinamento dell'aria nello spazio: essa potrebbe avere quindi valori differenti per inquinanti differenti.

Se c'è una completa miscelazione di aria e inquinanti, l'efficienza di ventilazione è pari a 1. I flussi di aria sono calcolati per un edificio o una zona all'interno di esso (per esempio se due zone dello stesso edificio fanno riferimento a diversi sistemi di ventilazione o possono considerarsi come indipendenti dai flussi di aria). L'aria entrante nell'edificio/zona è calcolata positivamente mentre quella uscente negativamente. Lo schema generale viene illustrato in Figura 2-1.

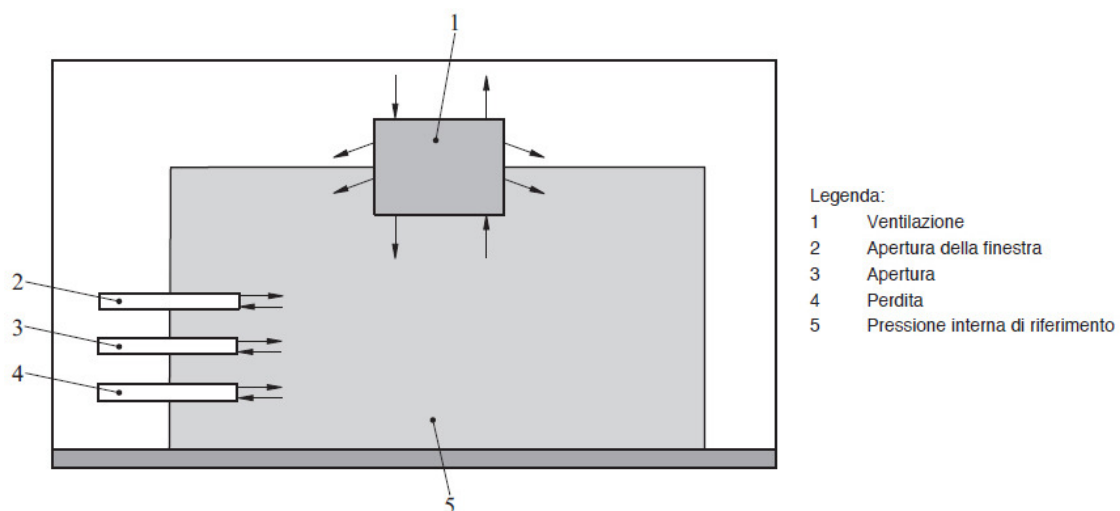


Figura 2-1 - Schema generale dell'edificio che illustra i differenti flussi coinvolti; da UNI EN 15242

La risoluzione dello schema è la seguente:

- 1) Stabilire le formule che danno i differenti flussi di aria per una pressione interna di riferimento
- 2) Calcolare la pressione interna di riferimento *irp* che bilancia i flussi di aria entranti e quelli uscenti
- 3) Calcolare i flussi di aria per questa pressione interna di riferimento

La norma prevede per le varie applicazioni lo stesso metodo, di natura iterativa, ma i parametri in entrata devono essere scelti secondo lo scopo e il campo di applicazione. Il metodo permette di calcolare i seguenti flussi:

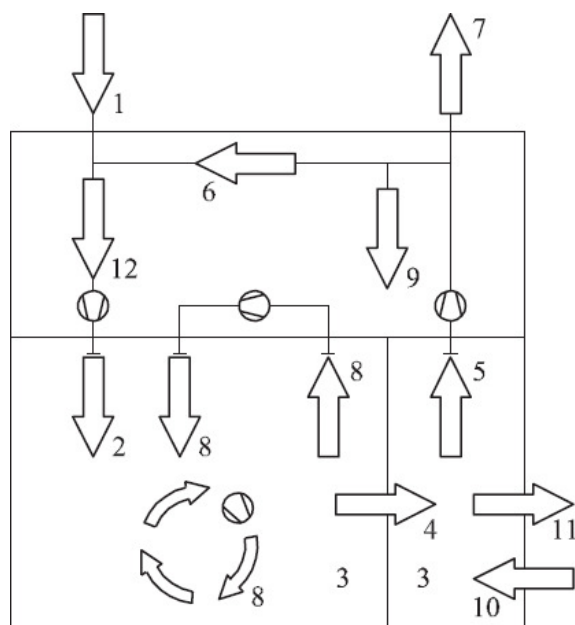
- a) Flusso d'aria delle unità di trattamento dell'aria (par. 6.2)
- b) Flusso d'aria attraverso le perdite dell'involucro (par. 6.6)
- c) Flusso d'aria attraverso le aperture (par. 6.5)

2.3.1.4 UNI EN 15243:2008

La norma definisce le modalità di calcolo di temperature, carichi sensibili e fabbisogno energetico degli ambienti per la progettazione; oltre a determinare i carichi degli impianti definisce l'approccio per il calcolo della prestazione energetica globale di edifici con impianti di climatizzazione dei locali.

2.3.1.5 UNI EN 13779:2008

La norma, pur non potendosi applicare agli edifici residenziali, è interessante per le dettagliate classificazioni di aria ambiente (Figura 2-2), in particolare l'aria esterna (ODA) e l'aria interna (IDA). Si riportano le classificazioni già viste nel capitolo II per completezza di esposizione.



Legenda

- 1 = Aria esterna (ODA)
- 2 = Aria di apporto (SUP)
- 3 = Aria interna (IDA)
- 4 = Aria trasferita (TRA)
- 5 = Aria estratta (ETA)
- 6 = Aria di ricircolo (RCA)
- 7 = Aria espulsa (EHA)
- 8 = Aria secondaria (SEC)
- 9 = Aria perduta dal sistema (LEA)
- 10 = Aria di infiltrazione (INF)
- 11 = Aria di esfiltrazione (EXF)
- 12 = Aria miscelata (MIA)

Figura 2-2 - Flussi di aria negli edifici secondo UNI EN 13779

In Tabella 2-3 e in Tabella 2-4 si riportano la classificazione dell'aria esterna e interna secondo la normativa, tenendo conto che la definizione delle categorie dipende dalla natura dei contaminanti presenti e dei loro effetti. In Tabella 2-5, tratta dall'appendice A, vengono descritte le caratteristiche di aria estratta (ETA) e aria espulsa (EHA). Si rimanda al capitolo III per ulteriori approfondimenti.

Categoria	Descrizione
ODA 1	Aria pura che può presentare polveri occasionali (per esempio pollini)
ODA 2	Aria esterna con alte concentrazioni di sostanza particolata e/o altri inquinanti gassosi
ODA 3	Aria esterna con altissime concentrazioni di sostanza particolata e/o altri inquinanti gassosi

Tabella 2-3 - Classificazione dell'aria esterna secondo UNI EN 13779

Categoria	Descrizione
IDA 1	Alta qualità dell'aria interna
IDA 2	Media qualità dell'aria interna
IDA 3	Modesta qualità dell'aria interna
IDA 4	Bassa qualità dell'aria interna

Tabella 2-4 - Classificazione dell'aria interna secondo UNI EN 13779

Categoria	Descrizione	Esempi
Aria estratta con basso livello di inquinamento		
ETA 1 EHA 1	Aria proveniente dai locali dove le principali fonti di emissione sono i materiali e le strutture di costruzione e aria proveniente da locali occupati dove le fonti di emissione principali sono il metabolismo umano e i materiali e le strutture di costruzione. Sono esclusi i locali in cui è consentito fumare.	Uffici, compresi i locali di piccoli magazzini integrati, spazi per il servizio pubblico, classi scolastiche, scalinate, corridoi, sale riunioni, spazi commerciali privi di fonti di emissione aggiuntive.
Aria estratta con moderato livello di inquinamento		
ETA 2 EHA 2	Aria proveniente da locali occupati che contiene più impurità provenienti dalle stesse fonti e/o da attività umane rispetto alla categoria 1. Locali compresi nella categoria ETA 1, ma dove è consentito fumare.	Sale da pranzo, cucine per la preparazione di bevande calde, negozi, locali magazzino in edifici per uffici, stanze di albergo, spogliatoi.
Aria estratta con alto livello di inquinamento		
ETA 3 EHA 3	Aria proveniente da locali nei quali l'emissione di umidità, processi, sostanze chimiche, ecc., riducono sensibilmente la qualità dell'aria.	Bagni e lavanderie, saune, cucine, sale per le fotocopie, locali progettati appositamente per fumatori.
Aria estratta con altissimo livello di inquinamento		
ETA 4 EHA 4	Aria contenente odori ed impurità dannosi per la salute in concentrazioni sensibilmente più elevate di quelle permesse per l'aria interna nelle zone occupate.	Cappe aspiranti per uso professionale, piani cottura e scarichi locali di cucine, garage e gallerie, parcheggi, locali adibiti all'utilizzo di vernici e solventi, locali per biancheria sporca, locali per rifiuti organici alimentari, sistemi di aspirazione centralizzati e locali per fumatori molto frequentati.

Tabella 2-5 - Classificazione dell'aria estratta e dell'aria espulsa secondo UNI EN 13779

2.3.2 Normative generali per la determinazione di portate d'aria

In questo paragrafo viene esposta la norma UNI 10339:1995 e la bozza di revisione e le norme americane redatte dall'Ashrae, la 62.1:2010 e la 62.2:2010.

2.3.2.1 UNI 10339

“*Impianti aeraulici a fini di benessere. Generalità, classificazione e requisiti*” è il titolo della norma che per anni è stata un riferimento alla progettazione impiantistica. E' tutt'ora in fase di revisione per poter correttamente soddisfare tutti i requisiti imposti dalle norme europee in ambito EPBD.

E' utile comunque riportare il prospetto III e il prospetto VIII (Tabella 2-6 e Tabella 2-7) che costituisce tuttora il principale riferimento per il dimensionamento degli impianti di ventilazione. Il prospetto III riporta, per varie destinazioni d'uso, le portate minime di aria esterna o di estrazione da garantire mentre il prospetto VIII indica gli indici di affollamento per individuare il numero di persone negli ambienti e individuare le portate complessive di rinnovo.

Categorie di edifici	Portata di aria esterna o di estrazione		Note
	Q_{op} (10^{-3} m ³ /s per persona)	Q_{os} (10^{-3} m ³ /s m ²)	
EDIFICI ADIBITI A RESIDENZA E ASSIMILABILI			
RESIDENZE A CARATTERE CONTINUATIVO			
- Abitazioni civili:			
• soggiorni, camere da letto	11	-	A
• cucina, bagni, servizi		estrazioni	
- Collegi, luoghi di ricovero, case di pena, caserme, conventi:			
• sale riunioni	9*	-	-
• dormitori/camere	11	-	-
• cucina	-	16,5	-
• bagni/servizi		estrazioni	A

Note : A - *Ricambio richiesto nei servizi igienici:*

- *edifici adibiti a residenza e assimilabili 0,0011 vol/s (4 vol/h);*

- *altre categorie in tabella 0,0022 vol/s (8 vol/h),*

il volume è quello relativo ai bagni (antibagni esclusi).

Tabella 2-6 - Portate di aria esterna in edifici adibiti ad uso civile
(estratto da prospetto III UNI 10339)

Classificazione degli edifici per categorie	n_s
EDIFICI ADIBITI A RESIDENZA E ASSIMILABILI	
- abitazioni civili: soggiorni, camere letto	0,04
- collegi, luoghi di ricovero, case di pena, caserme, conventi:	
• soggiorni	0,20
• sale riunioni	0,60
• dormitori	0,10
• camere letto	0,05
- alberghi, pensioni:	
• ingresso, soggiorni	0,20
• sale conferenze (piccole)	0,60
• camere letto	0,05

Tabella 2-7 - Indici di affollamento n_s per metro quadrato di superficie
(estratto da prospetto VIII UNI 10339)

Al paragrafo 9.1.1.3 la normativa indica che la presa di aria esterna⁴ non deve essere posta:

- In prossimità di una strada di grande traffico
- In prossimità di una ribalta di carico/scarico automezzi
- In zona prossima a scarichi di fumi o prodotti della combustione
- In punti vicini ad espulsioni industriali, di servizi igienici o comunque di aria viziata o contaminata; in tal caso la velocità in uscita del flusso d'aria deve essere scelta in modo da allontanare il più possibile il flusso d'aria dal fabbricato e consentire un'efficace diluizione con aria esterna
- In vicinanza di torri di raffreddamento o torri evaporative
- Ad una altezza minore di 4 m dal piano stradale più elevato di accesso all'edificio

La norma, come già sottolineato, è in fase di revisione e dovrebbe entrare a breve in inchiesta pubblica. La novità principale rispetto alla versione precedente risiederà nel fatto che, per garantire condizioni di comfort termoigrometrico negli ambienti e quindi porre attenzione alla qualità dell'aria interna, il progettista avrà a disposizione due approcci, la cui scelta è a sua discrezione (riportandola nella relazione tecnica) per raggiungere lo stesso risultato: uno prescrittivo e uno prestazionale, come già proposto dalle norme americane (più oltre descritte).

⁴ Si deve tenere anche in conto la direzione dei venti dominanti e la posizione relativa di sorgenti di inquinamento rispetto all'ubicazione della presa di aria esterna.

La scelta del metodo prestazionale può essere dettata ad esempio da condizioni di contaminazione che si discostano da quelle di riferimento (su cui si basa il metodo prescrittivo) o da esigenze di efficienza energetica che portano ad utilizzare sensori per la valutazione della qualità dell'aria interna.

In alternativa si applica l'approccio prescrittivo che vede la determinazione di portate d'aria in base al tipo di ambiente e al livello di occupazione, in base alla seguente formula:

$$Q_{v,o,n} = n \cdot q_{v,o,p} + A \cdot q_{v,o,s}$$

dove:

$$Q_{v,o,n} = \text{portata volumica di aria esterna nominale} \left[10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right]$$

n = affollamento di riferimento, ovvero numero di persone previste a progetto o calcolate mediante l'indice di affollamento per unità di superficie, n_s , espressa in m^2 , con l'equazione:

$$n = n_s \cdot A$$

$$q_{v,o,p} = \text{portata volumica di aria esterna minima per persona} \left[10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{s} \cdot \text{persona}} \right]$$

$$A = \text{area della superficie del locale in pianta} \left[\text{m}^2 \right]$$

$$q_{v,o,s} = \text{portata volumica di aria esterna minima per unità di superficie} \left[\frac{\text{m}^3}{\text{s} \cdot \text{m}^2} \right]$$

Il valore dell'indice di affollamento riferito alle abitazioni civili n_s rimane invariato rispetto alla norma del 1995 e pari a 0,04, mentre i valori di $q_{v,o,p}$ e $q_{v,o,s}$ sono riportati nel prospetto 14 della bozza in base alla classificazione della qualità dell'aria interna di progetto (Elevata, Media o Bassa) disponibile, insieme al confronto con quella prevista dalla UNI EN 13779, al prospetto 6.

Il metodo prestazionale, come già detto, può trovare applicazione in tutti i casi in cui l'adozione del metodo prescrittivo non è adeguata al raggiungimento di una idonea qualità dell'aria, a causa della presenza di contaminanti in qualità e in concentrazioni diverse da quelle che si hanno solitamente oppure in edifici e ambienti nei quali si

adottano sistemi di ventilazione a portata variabile (ad esempio a controllo di inquinanti con sensori). La procedura da seguire consiste in un bilancio di massa applicato ai singoli contaminanti di riferimento.

Il metodo di bilancio di massa richiede diversi passaggi:

1. individuare i singoli contaminanti di riferimento;
2. determinare i tassi di emissione delle sorgenti per ciascuno dei contaminanti di riferimento;
3. determinare le concentrazioni dei ciascuno dei contaminati di riferimento nell'aria esterna utilizzata ai fini della diluizione;
4. individuare i sistemi di filtrazione da adottare e le relative efficienze di filtrazione per i singoli contaminanti di riferimento;
5. individuare le concentrazioni massime ammissibili per ciascuno dei contaminanti di riferimento;
6. calcolare le portate di aria necessarie per rispettare i limiti di concentrazione per ciascuno dei contaminanti di riferimento;
7. adottare come valore di portata di aria esterna per il dimensionamento dell'impianto il maggiore tra quelli calcolati; il contaminante cui tale portata si riferisce viene considerato il contaminante di dimensionamento

Ai fini del progetto, si utilizza il valore di portata di aria esterna maggiore tra quello di dimensionamento, calcolato secondo quanto previsto al punto 7, e quello medio della portata per unità di superficie riportato nel prospetto 14.

2.3.2.2 ANSI/ASHRAE STANDARD 62.1:2010

Lo Standard 62.1-2010 (*Ventilation and acceptable indoor air quality in low-rise residential buildings*) è applicabile a tutti gli ambienti in cui è prevista la presenza di persone, ad esclusione delle case unifamiliari e plurifamiliari uguali o inferiori a tre piani. Nella norma sono contenute due metodologie per il calcolo delle portate d'aria, una più semplice basata sulle portate d'aria in funzione della tipologia di spazio da ventilare e una più complessa basata sul controllo della concentrazione massima di inquinanti e sulla qualità dell'aria percepita.

Il primo metodo prevede il calcolo di V_{bz} , la portata di aria esterna che deve essere garantita nella zona in cui si respira (*breathing zone*)

$$V_{bz} = R_p \cdot P_z + R_a \cdot A_z$$

dove:

A_z = superficie utile dello spazio occupato [m^2]

P_z = affollamento, inteso come numero massimo di persone contenute all'interno della zona occupata in condizioni standard

R_p = portata di aria esterna richiesta per persona $\left[\frac{l}{s \cdot pers} \right]$

R_a = portata di aria esterna richiesta per unità di superficie $\left[\frac{l}{s \cdot m^2} \right]$

I valori di R_p e R_a sono riportati in Tabella 2-8 da cui risulta che per gli edifici residenziali con più di tre piani R_p è pari a 2,5 l/s per persona e R_a pari a 0,3 l/s m^2 . P_z è pari a 2 persone per appartamenti con una camera da letto con l'aggiunta di una persona per ogni camera da letto aggiuntiva.

Occupancy Category	People Outdoor		Area Outdoor		Notes	Default Values		Air Class	
	Air Rate		Air Rate			Occupant Density (see Note 4)	Combined Outdoor Air Rate (see Note 5)		
	R_p	R_a	R_p	R_a			#/1000 ft ² or #/100 m ²		cfm/person
	cfm/person	L/s-person	cfm/ft ²	L/s-m ²					
Residential									
Dwelling unit	5	2.5	0.06	0.3	F,G	F		1	
Common corridors	–	–	0.06	0.3				1	

ITEM-SPECIFIC NOTES FOR TABLE 6-1

A For high school and college libraries, use values shown for Public Assembly Spaces—Libraries.

B Rate may not be sufficient when stored materials include those having potentially harmful emissions.

C Rate does not allow for humidity control. Additional ventilation or dehumidification may be required to remove moisture. "Deck area" refers to the area surrounding the pool that would be expected to be wetted during normal pool use, i.e., when the pool is occupied. Deck area that is not expected to be wetted shall be designated as a space type (for example, "spectator area").

D Rate does not include special exhaust for stage effects, e.g., dry ice vapors, smoke.

E When combustion equipment is intended to be used on the playing surface, additional dilution ventilation and/or source control shall be provided.

F Default occupancy for dwelling units shall be two persons for studio and one-bedroom units, with one additional person for each additional bedroom.

G Air from one residential dwelling shall not be recirculated or transferred to any other space outside of that dwelling.

Tabella 2-8 - Valori di portata di aria esterna richiesti per persone e per unità di superficie (estratto da tabella 6-1 ASHRAE 62-1:2010)

La seconda metodologia è basata invece sulla qualità dell'aria percepita (IAQ) e sul controllo della concentrazione massima di inquinanti. La norma, al punto 6.3.1.4 (Approcci progettuali) indica quattro possibilità tra cui un'analisi basata sul bilancio in

massa per un singolo ambiente. Alcune equazioni per il calcolo della portata di ventilazione sono riportate in Tabella 2-9 tratta dall'appendice A della norma.

Required Recirculation Rate			Required Outdoor Airflow	Space Contaminant Concentration
Filter Location	Flow	Outdoor Airflow		
None	VAV	100%	$V_o = \frac{N}{E_v F_r (C_s - C_o)}$	$C_s = C_o + \frac{N}{E_v F_r V_o}$
A	Constant	Constant	$V_o = \frac{N - E_v R V_r E_f C_s}{E_v (C_s - C_o)}$	$C_s = \frac{N + E_v V_o C_o}{E_v (V_o + R V_r E_f)}$
A	VAV	Constant	$V_o = \frac{N - E_v F_r R V_r E_f C_s}{E_v (C_s - C_o)}$	$C_s = \frac{N + E_v V_o C_o}{E_v (V_o + F_r R V_r E_f)}$
A	VAV	Proportional*	$V_o = \frac{N - E_v F_r R V_r E_f C_s}{E_v F_r (C_s - C_o)}$	$C_s = \frac{N + E_v F_r V_o C_o}{F_r E_v (V_o + R V_r E_f)}$
B	Constant	Constant	$V_o = \frac{N - E_v R V_r E_f C_s}{E_v [C_s - (1 - E_f) C_o]}$	$C_s = \frac{N + E_v V_o (1 - E_f) C_o}{E_v (V_o + R V_r E_f)}$
B	VAV	100%	$V_o = \frac{N}{e F_r [C_s - (1 - E_f) C_o]}$	$C_s = \frac{N + e F_r V_o (1 - E_f) C_o}{e F_r V_o}$
B	VAV	Constant	$V_o = \frac{N - E_v F_r R V_r E_f C_s}{E_v [C_s - (1 - E_f) C_o]}$	$C_s = \frac{N + E_v V_o (1 - E_f) C_o}{E_v (V_o + F_r R V_r E_f)}$
B	VAV	Proportional	$V_o = \frac{N - E_v F_r R V_r E_f C_s}{E_v F_r [C_s - (1 - E_f) C_o]}$	$C_s = \frac{N + E_v F_r V_o (1 - E_f) C_o}{E_v F_r (V_o + R V_r E_f)}$

* Proportional indicates that the outdoor airflow varies with the supply airflow, such that the outdoor airflow is equal to the design value times the flow reduction factor F_r .

Tabella 2-9 - Portata d'aria esterna richiesta e concentrazione dei contaminanti (tratta da ASHRAE 62.1:2010)

dove:

A,B = posizione dei filtri

V = portata in volume

C = concentrazione dell'inquinante

e = efficienza di ventilazione

E_f = efficienza di filtrazione

F_r = fattore di riduzione della portata

N = tasso di generazione dell'inquinante

R = fattore di ricircolo

X_o = quantità riferita allo spazio esterno

X_r = quantità di ritorno

X_s = quantità riferita allo spazio interno

La Figura 2-3 rappresenta un sistema tipico. I filtri possono essere localizzati nel circuito di ricircolo (posizione A) o prima dello spazio da ventilare (posizione B).

Un sistema a portata variabile (VAV) riduce il tasso di circolazione quando il carico termico è soddisfacente. Questo viene conteggiato introducendo un fattore di riduzione della portata F_r .

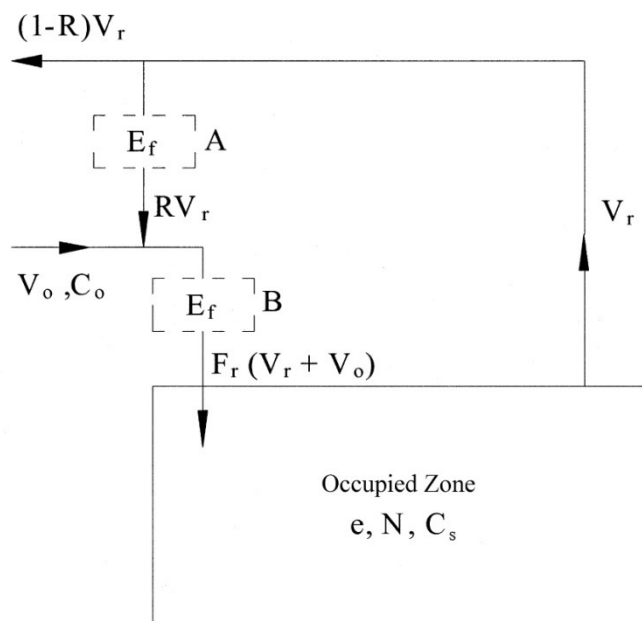


Figura 2-3 - Sistema di ventilazione in assenza di infiltrazione/esfiltrazione e a portata variabile (da ASHRAE 62.1:2010)

2.3.2.3 ANSI/ASHRAE STANDARD 62.2:2010

Questa norma rappresenta il punto di riferimento nella progettazione a livello Americano. Lo standard 62.2 è applicabile nella quasi totalità degli edifici residenziali statunitensi (“*low-rise residential buildings*”) e definisce i requisiti minimi dei sistemi di ventilazione meccanica e naturale e dell’involucro per conseguire livelli accettabili di qualità dell’aria interna.

Il capitolo 4 si occupa dell’aspetto primario di ventilazione dell’intera abitazione: a tal fine devono essere installati per ogni unità abitativa sistemi di ventilazione meccanica, al fine di garantire una portata d’aria non inferiore ai valori ricavati dalle formule seguenti:

$$Q_{fan} = 0,01A_{floor} + 7,5(N_{br} + 1) \quad \text{oppure} \quad Q_{fan} = 0,05A_{floor} + 3,5(N_{br} + 1)$$

dove:

Q_{fan} = portata del ventilatore $\left[\frac{l}{s} \right]$

A_{floor} = superficie utile dell'appartamento $[m^2]$

N_{br} = numero delle camere da letto, non inferiore a 1

L'affollamento che si assume è pari a due persone in un monolocale, o in un appartamento con una camera da letto, e una persona aggiuntiva per ogni camera da letto in più. Se la densità è maggiore bisogna aggiungere 3,5 l/s per ogni persona eccedente.

In alternativa alle due equazioni riportate sopra è possibile utilizzare i valori esposti in Tabella 2-10.

Superficie (m ²)	Numero di stanze da letto				
	0-1	2-3	4-5	6-7	>7
<139	14	21	28	35	42
139,1-279	21	28	35	42	50
279,1-418	28	35	42	50	57
418,1-557	35	42	50	57	64
557,1-697	42	50	57	64	71
>697	50	57	64	71	78

Tabella 2-10 - Portate di ventilazione richieste (da ASHRAE 62.2:2010)

Si vuole far notare che questi valori⁵ sono ricavati per un'altezza degli ambienti tipica delle residenze americane, per cui si riporta, a titolo informativo, la Tabella 2-11 corretta per altezze di ambienti media uguale a 2,7 m e con riferimento al valore medio dell'area negli intervalli considerati.

⁵ Le portate indicate nelle due tabelle sono comprensive di un'infiltrazione convenzionale pari a 10 l/s per ogni 100 m² di superficie calpestabile.

Superficie (m ²)	Numero di stanze da letto				
	0-1	2-3	4-5	6-7	>8
70	0,27	0,4	0,54	0,67	0,81
209	0,13	0,18	0,22	0,27	0,32
349	0,11	0,13	0,16	0,19	0,22
488	0,1	0,11	0,14	0,16	0,18
627	0,09	0,11	0,12	0,14	0,15
697	0,1	0,11	0,12	0,14	0,15

Tabella 2-11 - Portate di ventilazione corrette per un'altezza di 2,7 m (Raisa, et al., 2010)

Oltre al requisito di ventilazione globale, nello Standard 62.2 è espresso anche il requisito di garantire delle portate di estrazione dai bagni e dalle cucine, che possono essere fatte in modo continuo o intermittente. Nelle cucine la portata da estrarre è pari a 50 l/s, se il sistema è intermittente e 5 h^{-1} (usando il volume della cucina) se continuo. Le portate di estrazione dai bagni sono rispettivamente 25 l/s per funzionamento intermittente e 10 l/s per funzionamento continuo: tali valori sono notevolmente superiori a quelli delle norme europee.

2.3.3 Muffe e condense

Si è già discusso del fatto che la qualità dell'aria interna sia un parametro fondamentale di progettazione in quanto le persone trascorrono la maggior parte della giornata all'interno di edifici.

La presenza di agenti biologici nell'aria interna è attribuita a una eccessiva umidità e un'inadeguata ventilazione. Sfavorevoli combinazioni di umidità e temperatura interna possono quindi portare alla condensazione di acqua sulle superfici, seguita dalla lenta decomposizione dei materiali e alla crescita di microbi, come muffe, funghi e batteri, che emettono successivamente spore, cellule, frammenti e composti organici volatili nell'aria ambiente. Oltretutto l'umidità porta al lento degrado chimico e biologico dei materiali da costruzione, inquinando ulteriormente l'aria interna.

La continua esposizione a contaminanti microbici è clinicamente associato a sintomi respiratori, allergie, asma e reazioni immunologiche. Numerosi studi effettuati in paesi Europei, ma anche negli Stati Uniti e Canada hanno mostrato come nel 2004 almeno il 20% degli edifici possieda uno o più segni di umidità (WHO EUROPE 2009).

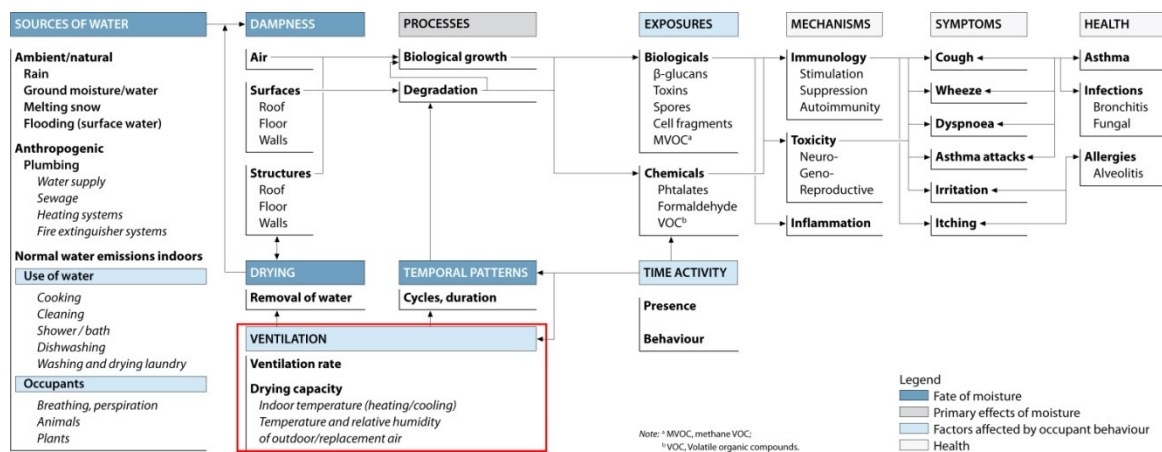


Figura 2-4 - Legame tra umidità e salute (WHO EUROPE 2009)

In Figura 2-4 è evidenziato il ruolo della ventilazione, cioè quello di rimuovere o diluire gli inquinanti, controllare temperatura e umidità all'interno degli ambienti, ridurre i problemi respiratori, assicurare almeno 10l/s per persona per ridurre i sintomi della sindrome da edificio malato e garantire il minimo comfort.(WHO EUROPE 2009)

Le muffe e i funghi sono organismi mono e pluricellulari che si trovano ovunque. La muffa è originata da una cellula, detta “ifa”, dalla quale si sviluppa un filamento colorato denominato “micelio” che conferisce l’aspetto caratteristico della muffa. Durante la sua crescita essa produce particelle di forma sferica e di piccole dimensioni, le spore, che si disperdono nell’aria e costituiscono la parte finale del ciclo riproduttivo delle muffe, che di per sé non costituiscono un problema negli ambienti, a meno non si depositino su un punto umido dove poter svilupparsi grazie a favorevoli condizioni. Fonte di nutrimento per le muffe sono i materiali che formano le superfici che trasformano in cibo insinuandosi nelle porosità e nelle fessure dei contribuendo alla decoesione dei materiali. Per la crescita di una muffa è necessaria una piccola quantità di nutrienti, anche solo depositi superficiali di polvere o grassi: per questo motivo le muffe possono crescere anche su superfici inorganiche come l’intonaco. (Figura 2-5)



Figura 2-5 – Formazione di muffa in corrispondenza di punti critici della costruzione

Esistono molte specie di muffe con caratteristiche differenti tra loro: il *Cladosporium*, cresce in particolare nelle guarnizioni dello sportello dei frigoriferi e ha cadenza stagionale, l’*Aspergillus* invece è presente tutto l’anno e tollera temperature fino ai 70°C. La stagione più favorevole per la loro formazione è comunque l’inverno in cui si assiste ad una produzione di vapore maggiore e poiché la minore tendenza ad aprire le finestre diminuisce la ventilazione, oltre al fatto che le temperature superficiali delle pareti sono più fredde. Un aspetto molto importante e tema di diversi contenziosi è la formazione di muffe in edifici poco isolati, mal ventilati e che presentano errori di costruzione comportando alti livelli di umidità negli elementi costruttivi e nell’aria interna. (Figura 2-5)

L'unità di misura del numero di microorganismi è l'*Unità Formante Colonia* (UFC o in inglese CFU) e la concentrazione è espressa in cfu/m³ di aria.

Provenendo essenzialmente dall'esterno, la presenza di questi organismi è legata all'alternarsi delle stagioni: in estate la concentrazione di spore nell'aria esterna si attesta intorno a 50.000 per m³ d'aria, diminuendo durante l'inverno fino a qualche centinaia per m³ d'aria. In normali condizioni di igienicità, in abitazioni che non risultano compromesse dalla presenza visibile di muffe, i livelli di spore variano tra 6 e 2200 cfu/m³ mentre gli ambienti compromessi dalle muffe i valori si aggirano tra 10.000 e 15.000 cfu/m³ (Raisa, et al., 2010).

Sebbene la maggior parte dei funghi non abbia una conseguenza diretta sulla salute umana, alcuni di questi possono dare origine a problemi che possono presentarsi entro alcuni giorni dall'esposizione (effetti acuti), oppure causare effetti a lunga durata (effetti cronici) come allergie, asma, infezioni fino a produrre patologie pericolose come l'istoplasmosi polmonare. (Moro, et al., 2009)

L'utilizzo di fungicidi è un rimedio di tipo temporaneo in quanto, oltre a provocare effetti sulla salute umana, senza accorgimenti particolari come una migliore ventilazione, un migliore riscaldamento o la minore produzione interna di vapore acqueo, la crescita di muffe si ripristinerà non appena il fungicida avrà terminato il suo effetto.

2.3.3.1 UNI EN ISO 13788:2003

La norma di riferimento a livello italiano è la UNI EN ISO 13788 che descrive un metodo di riferimento per determinare la temperatura superficiale interna minima dei componenti edilizi tale da evitare la crescita di muffe, in corrispondenza di valori prefissati di temperatura e umidità relativa interna.

Le procedure proposte dalla norma sono valide nel caso di regime stazionario e sono applicate su base mensile. A questa norma fa riferimento anche il D.Lgs. 311/06 al comma 8 delle disposizioni transitorie, in cui indica che in assenza di impianto di condizionamento, di utilizzare per le condizioni interne la pressione parziale di vapore che compete ad una temperatura di 20° C e per un valore di umidità relativa 65%.

Il calcolo effettuato in regime stazionario tuttavia non è propriamente corretto in quanto l'attuale stile di vita porta la maggior parte degli abitanti al lavoro o comunque a non essere presenti all'interno dell'edificio durante la maggior parte delle ore di una giornata.

Pertanto si può rilevare una intensa generazione di umidità e vapore in maniera non costante e la pressione parziale all'interno è variabile (Baggio, et al., 2009).

Progettazione per evitare la crescita di muffe

I fattori più importanti che influenzano la crescita sui materiali igroscopici sono l'umidità relativa e temperatura. In Figura 2-6 si riportano le condizioni ambientali critiche di temperatura e umidità relativa superficiali per il loro sviluppo

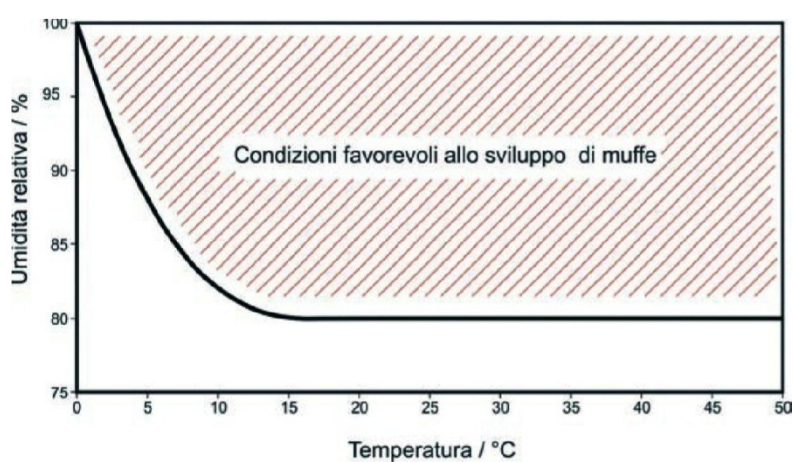


Figura 2-6 - Condizioni di temperatura e umidità favorevoli allo sviluppo di muffe (Moro, et al., 2009)

Si può notare che per temperature superiori ai 20°C le condizioni critiche sono raggiunte con umidità relative maggiori o uguali al 80%. La norma infatti indica che per evitare la crescita di muffe l'umidità relativa in corrispondenza delle superfici non deve essere maggiore di 0,8 per periodi di tempo di diversi giorni.

Per ciascuno dei mesi dell'anno risulta necessario seguire i seguenti passi:

- a) Definire la temperatura dell'aria esterna ϑ_e : si adotta il valore riportato nella UNI 10349
- b) Definire la pressione parziale del vapore esterna p_{ve} : si adotta il valore riportato nella UNI 10349
- c) Definire la temperatura interna degli ambienti: per edifici destinati ad abitazione e simili si possono adottare i seguenti valori
 - $\vartheta_i = 20$ °C nei mesi in cui è in funzione l'impianto di riscaldamento

- $\vartheta_i = 18 \text{ }^\circ\text{C}$ nei mesi in cui l'impianto di riscaldamento non è in funzione, ma la temperatura esterna media è $< 18 \text{ }^\circ\text{C}$
 - $\vartheta_i = \vartheta_e$ nei mesi in cui la temperatura esterna media mensile è $\geq 18 \text{ }^\circ\text{C}$
- d) Definire la pressione parziale del vapore interna $p_{vi} = p_{ve} + \Delta p_v$ secondo una delle tre procedure definite dalla norma e riportate in seguito
- 1) Bilancio igrometrico dell'ambiente in regime stazionario

$$\Delta p_v = \frac{GR_v}{nV} \left(\frac{T_i + T_e}{2} \right)$$

Dove:

p_{vi} = pressione parziale del vapore interno [Pa]

p_{ve} = pressione parziale del vapore esterno [Pa]

$R_v = R / M_v = 462 \text{ J}/(\text{KgK})$ costante dei gas per il vapore acqueo

V = volume dell'edificio [m^3]

G = produzione di umidità all'interno degli ambienti [Kg/h]

T_i = temperatura aria interna [K]

T_e = temperatura aria esterna [K]

n = rinnovo d'aria medio giornaliero [h^{-1}]

Negli esempi riportati nella stessa norma i calcoli sono effettuati utilizzando il valore di T_i e non il valore medio tra interno ed esterno. Per quanto riguarda i valori relativi alla produzione di vapore G , da utilizzare nei calcoli, la 13788 non fornisce alcuna indicazione.

Alcune ricerche (TenWolde, 1994) suggeriscono, nel caso di edifici residenziali, i valori riportati in Tabella 2-12, oppure si può fare riferimento a quanto indicato nella CEN TR 14788 descritta successivamente.

Numero stanze da letto	kg/giorno	kg/h
1	8	0.333
2	12	0.500
3	14	0.583
4	15	0.625
Ogni stanza in più	1	0.042

Tabella 2-12 - Generazione di vapore negli edifici residenziali (TenWolde, 1994)

Il numero di ricambi orari da utilizzare può essere mantenuto costante oppure, come indicato all'appendice nazionale della norma, in assenza di più specifiche informazioni, per edifici adibiti ad abitazione, privi di sistemi di ventilazione meccanica, può utilizzarsi l'espressione seguente

$$n = 0,2 + 0,04\vartheta_e \quad [h^{-1}]$$

dove:

ϑ_e = temperatura esterna media mensile secondo la UNI 10349;

per $\vartheta_e \leq 0$ si assuma $n = 0,2$

Il necessario rinnovo d'aria deve essere tuttavia determinato in funzione delle condizioni interne assunte, al fine di prevenire la formazione di condensa superficiale o interstiziale. Questa relazione, come sottolinea l'appendice, fornisce il valore minimo di rinnovo dell'aria riscontrabile in edifici adibiti ad abitazione privi di sistemi di ventilazione e costituisce una stima prudenziale della ventilazione ai fini delle verifiche. Perciò non indica un valore ottimale che deve essere invece determinato nel rispetto delle condizioni di igiene e salubrità regolamentate dalle disposizioni vigenti.

Il primo termine tiene conto della ventilazione comunque generata dalle infiltrazioni attraverso i serramenti mentre il secondo termine prova ad approssimare il comportamento dell'utenza (apertura di finestre e porte esterne) in funzione delle condizioni climatiche esterne.

Se il rinnovo di aria e/o f_{Rsi} non risultano sufficienti, si rende necessario progettare un sistema di ventilazione che garantisca un rinnovo di aria adeguato. E' comunque

necessario un adeguato controllo del tasso di ventilazione, anche al fine di contenere i consumi energetici.

2) Utilizzo delle classi di umidità

Con questo metodo si utilizza sempre la relazione $p_{vi} = p_{ve} + \Delta p_v$, ma questa volta il termine Δp_v viene valutato in riferimento al diagramma di Tabella 2-13 presente nell'appendice A e più oltre riportato. In questo caso l'incremento è funzione della temperatura media mensile dell'aria esterna e delle classi di concentrazione del vapore all'interno dell'ambiente riportate in Tabella 2-13 tratta dalla stessa appendice.

Classe di umidità	Edificio
1	Magazzini
2	Uffici, negozi
3	Alloggi con basso indice di affollamento
4	Alloggi con alto indice di affollamento, palestre, cucine, cantine; edifici riscaldati con sistemi a gas senza camino
5	Edifici speciali, per esempio lavanderie, distillerie, piscine

Tabella 2-13 - Classi di umidità interne (da UNI EN ISO 13788:2003)

Si può notare come, per ogni classe di umidità, il valore massimo viene raggiunto e poi mantenuto costante per temperature medie mensili dell'aria esterna inferiori a 0°C. Tra 0 e 20°C il valore decresce linearmente fino ad annullarsi per $\vartheta_e = 20^\circ\text{C}$. Tale andamento considera la tendenza del comportamento dell'utenza di incrementare la ventilazione all'aumentare della temperatura esterna. La norma raccomanda di utilizzare per ogni classe di umidità il valore limite superiore; inoltre l'appendice nazionale suggerisce che, in assenza di più specifiche informazioni, per edifici ad uso abitativo, si adottino i valori riportati nel grafico di Figura 2-7 con riferimento alla spezzata che divide le zone di classe 3, produzione "media" e di classe 4, produzione "alta".

Legenda

X Temperatura media mensile dell'aria esterna, θ_e in °C

Y Δv in kg/m³

Z Δp in Pa

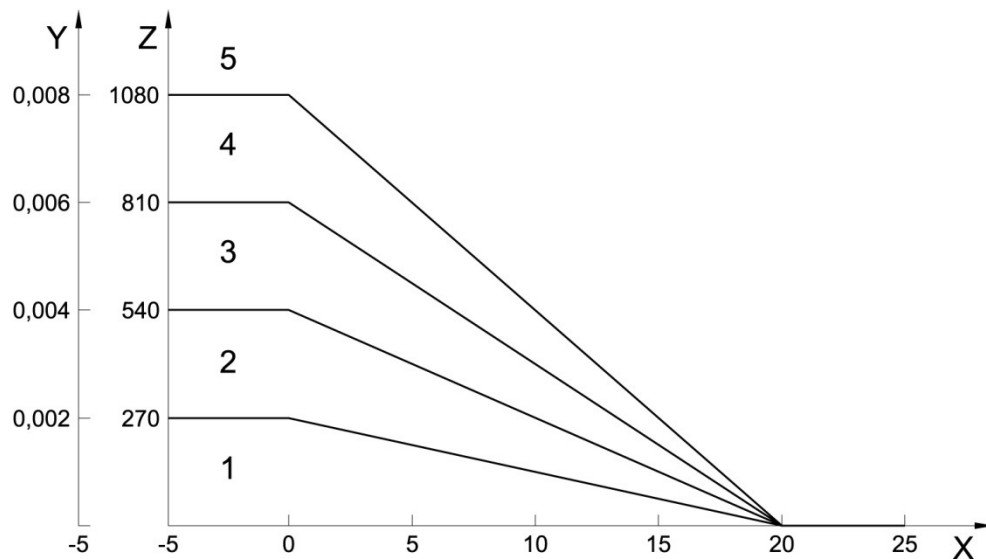


Figura 2-7 - Variazione delle classi di umidità interna in funzione della temperatura esterna (da UNI EN ISO 13788:2003)

3) Umidità relativa costante

In presenza di un impianto di condizionamento che assicuri l'umidità relativa interna RH_i la pressione parziale da assumere è:

$$p_{vi} = RH_i p_{vs}(\vartheta_i)$$

Scelta opportunamente una delle tre procedure, la norma prevede di eseguire le verifiche con un margine di sicurezza moltiplicando il valore di Δp_v per il coefficiente 1,10, nel caso di adozione delle prime due procedure, e incrementando l'umidità relativa di 0,05 nel caso della terza procedura.

-
- e) Valutare il valore minimo accettabile della pressione di saturazione p_{sat} con un valore massimo accettabile di umidità relativa in corrispondenza della superficie pari a 0,8 per evitare la crescita di muffe.

$$p_{sat}(\theta_{si}) = \frac{p_i}{0,8}$$

- f) Determinare la temperatura superficiale minima accettabile $\theta_{si,min}$ a partire dalla p_{sat} utilizzando ad esempio le equazioni fornite nell'appendice E

$$\theta = \frac{237,3 \log_e \left(\frac{p_{sat}}{610,5} \right)}{17,269 - \log_e \left(\frac{p_{sat}}{610,5} \right)} \quad \text{per } p_{sat} \geq 610,5 Pa$$

$$\theta = \frac{265,5 \log_e \left(\frac{p_{sat}}{610,5} \right)}{21,875 - \log_e \left(\frac{p_{sat}}{610,5} \right)} \quad \text{per } p_{sat} \leq 610,5 Pa$$

- g) Calcolare il fattore di temperatura sulla superficie interna $f_{Rsi} = \frac{\theta_{si,min} - \theta_e}{\theta_i - \theta_e}$
- h) Si definisce mese critico quello con il più alto valore di f_{Rsi} e prende il nome di $f_{Rsi,max}$. Il componente edilizio deve essere progettato in modo tale da avere un fattore f_{Rsi} sempre maggiore di $f_{Rsi,max}$

Nel caso il componente sia adiacente al terreno si deve assumere la temperatura media annuale dell'aria e la pressione parziale a cui compete un'umidità relativa in condizione di saturazione (UR = 100%).

Per il progetto di un dato edificio, i valori effettivi di f_{Rsi} possono essere ottenuti come segue:

- Per elementi piani, da $f_{Rsi} = \frac{(U^{-1} - R_{si})}{U^{-1}} = 1 - R_{si} \cdot U$
- Per trasmissione del calore in geometria non monodimensionale (ad esempio ponti termici), attraverso simulazioni numeriche con codici di calcolo agli elementi finiti.

Nella norma le resistenze termiche superficiali R_{si} sono assunte pari a $0,13 \text{ m}^2 K / W$ per vetri e telai e $0,25 \text{ m}^2 K / W$ per tutte le altre superfici interne. Quest'ultimo valore è

calcolato considerando come caso più sfavorevole quello di rischio di condensazione in un angolo o dovuto alla presenza di ostruzioni che riducono lo scambio radiativo.

Progettazione per evitare condensazione superficiale su strutture leggere

Nel caso di strutture leggere, che rispondono a variazioni di temperatura in tempi molto inferiori a un giorno, deve essere utilizzata la seguente procedura:

- a) Definire la temperatura dell'aria esterna ϑ_e come la media delle temperature minime annuali
- b) Definire l'umidità relativa esterna pari a 0,95 e calcolare la pressione del vapore con l'equazione

$$p_{ve} = RH_e p_{sat}(\vartheta_e)$$

- c) Definire la temperatura interna degli ambienti: per edifici destinati ad abitazione e simili si possono adottare i seguenti valori
 - $\vartheta_i = 20\text{ °C}$ nei mesi in cui è in funzione l'impianto di riscaldamento
 - $\vartheta_i = 18\text{ °C}$ nei mesi in cui l'impianto di riscaldamento non è in funzione, ma la temperatura esterna media è $< 18\text{ °C}$
 - $\vartheta_i = \vartheta_e$ nei mesi in cui la temperatura esterna media mensile è $\geq 18\text{ °C}$

d) Calcolare Δp_v come al punto d) del precedente paragrafo

e) Valutare il valore minimo accettabile della pressione di saturazione p_{sat} con un valore massimo accettabile di umidità relativa in corrispondenza della superficie pari a 1

$$p_{sat}(\theta_{si}) = p_i$$

f) Determinare la temperatura superficiale minima accettabile $\theta_{si, \min}$ a partire dalla p_{sat} utilizzando ad esempio le equazioni fornite nell'appendice E

$$\theta = \frac{237,3 \log_e \left(\frac{p_{sat}}{610,5} \right)}{17,269 - \log_e \left(\frac{p_{sat}}{610,5} \right)} \quad \text{per } p_{sat} \geq 610,5 Pa$$

$$\theta = \frac{265,5 \log_e \left(\frac{p_{sat}}{610,5} \right)}{21,875 - \log_e \left(\frac{p_{sat}}{610,5} \right)} \quad \text{per } p_{sat} \leq 610,5 Pa$$

- g) Calcolare il fattore di temperatura sulla superficie interna $f_{Rsi} = \frac{\theta_{si,min} - \theta_e}{\theta_i - \theta_e}$
- h) Si definisce mese critico quello con il più alto valore di f_{Rsi} e prende il nome di $f_{Rsi,max}$. Il componente edilizio deve essere progettato in modo tale da avere un fattore f_{Rsi} sempre maggiore di $f_{Rsi,max}$

2.3.3.2 CEN TR 14788:2006

Lo scopo principale di questa norma, intitolata “*Ventilation for buildings. Design and dimensioning of residential ventilation systems*” è, come riportato al punto 7.1.4, quello di raggiungere un ragionevole livello di qualità dell’aria interna evitando sprechi di energia. Ciò significa:

- Mantenere la concentrazione di CO₂ al di sotto di un certo livello
- Mantenere la quantità di umidità in modo tale da evitare un ambiente troppo secco ed evitare il proliferarsi di muffe e condensa
- Rimuovere gli odori in un tempo ragionevole
- Mantenere la concentrazione degli inquinanti presenti nell’aria interna al di sotto di determinati valori

Il paragrafo 7.1.5 introduce il metodo di calcolo da seguire; il primo passo è quello di determinare, per ciascuna stanza di cui è composta l’abitazione, l’inquinante che può essere presente e che deve essere smaltito (o mantenuto sotto controllo). Si assume che se l’inquinante con concentrazione maggiore, ovvero il principale (*key pollutant*), è adeguatamente controllato allora anche tutti gli altri contaminanti lo sono automaticamente. I principali inquinanti per i vari ambienti sono solitamente:

- Cucine: vapore acqueo, odori e CO₂ (dai prodotti della combustione)
- Bagni, lavanderia/ripostiglio: vapore acqueo
- WC: odori

Ovviamente altri inquinanti possono essere presenti durante attività specifiche; se si conoscono è opportuno inserirli nel metodo di calcolo. Ad esempio il paragrafo 7.1.8 prende in considerazione l'inquinamento da fumo di tabacco (ETS). Nel caso in cui vi siano ambiente suscettibili di presenza di fumo da tabacco la norma suggerisce di aumentare le portate d'aria con un fattore moltiplicatore variabile tra 2 e 10.

I valori dei tassi di emissione degli inquinanti devono essere calcolati per ogni stanza utilizzando dati a disposizione oppure i valori forniti all'appendice A, conoscendo ad esempio il numero di persone presenti nell'abitazione e le loro abitudini. A questo proposito si riportano le Tabella 2-14,15,16 e 17 tratte dall'appendice della norma.

Attività	Produzione di vapore acqueo	Produzione di CO ₂
<i>Adulto che dorme</i>	40 g/h (0,014 l/s)	-
<i>Adulto in attività domestica</i>	55 g/h (0,019 l/s)	-
<i>Adulto seduto</i>	-	0,004 l/s
<i>Adulto in attività leggera</i>	-	0,006 - 0,013 l/s

Tabella 2-14 - Emissione di inquinanti dovuti alla respirazione umana (ricavata da appendice A.1 CEN TR 14788)

a) Umidità giornaliera prodotta per diverse attività domestiche			
Attività domestiche			Quantità di umidità prodotta
Cucinare (forno elettrico)			2 kg/giorno
Cucinare (fornelli a gas)			3 kg/giorno
Lavaggio dei piatti a mano			0,4 kg/giorno
Igiene personale (bagno,doccia)			0,2 kg/giorno a persona
Lavaggio dei vestiti (a mano o in lavatrice)			0,5 kg/giorno
Asciugatura dei vestiti (per essiccazione o asciugatrice)			1,5 kg/giorno a persona
b) Umidità complessiva prodotta giornalmente in seguito alle attività domestiche			
Numero di persone in attività	Bassa emissione di umidità [kg]	Media emissione di umidità [kg]	Alta emissione di umidità [kg]
1	3,5	6	9
2	4	8	11
3	4	9	12
4	5	10	14
5	6	11	15
6	7	12	16
Bassa: quando gli occupanti non generano troppa umidità in seguito alla loro attività anche perché spesso l'alloggio non è occupato; la pressione interna di vapore eccede quella esterna di circa 0,3 kPa			
Media: quando le umidità interne sono pressochè normali; la pressione interna di vapore eccede quella esterna di circa 0,3 - 0,6 kPa			
Alta: la pressione interna di vapore eccede quella esterna di oltre 0,6 kPa			

Tabella 2-15 - Tassi di generazione di umidità (da CEN TR 14788:2006)

Stanza	Emissione di vapore	Durata	Attività
Cucina	0,6 l/s	10 min	Cucinare tre cose consecutivamente durante lo stesso tempo di occupazione della cucina
	seguiti da 1,0 l/s	10 min	
	seguiti da 1,5 l/s	10 min	
Bagno	0,5 l/s	10 min	Doccia di una persona
	0,06 l/s	12 ore	Asciugatura vestiti
NOTA: Approssimativamente la densità del vapore acqueo è 0,8 kg/m ³ a 0°C e 1013 mbar			

Tabella 2-16 - Generazione di umidità espressa in l/s di vapore con condizioni di progetto indicate in termini di durata di emissione per ogni attività (da CEN TR 14788:2006)

Combustibile	CO ₂ (l/s per kW di input)	Vapore acqueo (g/h per kW di input)
Gas naturale	0,027	150
Gas artificiale	0,027	100
GPL	0,033	130
Kerosene	0,034	100

Tabella 2-17 - Apparecchi per la combustione⁶: tassi di produzione di CO₂ e vapore acqueo (da CEN TR 14788:2006)

Il metodo di calcolo, esposto all'appendice E, si compone di due parti: nella prima si considera che l'inquinante venga rilasciato a tasso costante, mentre nella seconda l'inquinante è rilasciato in modo intermittente. Il vapore acqueo si comporta in maniera differente rispetto ad altri inquinanti, in quanto è possibile che questo condensi e ri-evapori dalle superfici per cui non viene esaminato con questo metodo (si rimanda all'allegato C e H della norma in questione per ulteriori approfondimenti).

1) Inquinante rilasciato a tasso costante

La concentrazione, c , di un inquinante introdotto a tasso costante in uno spazio ventilato di volume V è data da:

$$c = \left(\frac{Q \cdot c_e + q \cdot c_i}{Q + q} \right) \left(1 - e^{-\left(\frac{Q+q}{V} \right) t} \right)$$

dove:

⁶ Per un singolo periodo di cottura dei cibi con gas naturale si suggerisce di utilizzare il valore di tasso di emissione di CO₂ pari a 0,05 l/s per una durata di 30 min.

q è la portata dell'inquinante $\left[\frac{l}{s} \right]$

V è il volume dello spazio ventilato $[l]$

Q è la portata di ricambio dell'aria esterna $\left[\frac{l}{s} \right]$

c_e è la concentrazione dell'inquinante nell'aria esterna $\left[\frac{g}{l} \right]$

c_i è la concentrazione dell'inquinante nell'aria interna $\left[\frac{g}{l} \right]$

t è il tempo conteggiato a partire dal momento di afflusso dell'inquinante $[s]$

Il rapporto Q/V è solitamente chiamato tasso di ventilazione R (n), ricambi d'aria orari. All'aumentare del tempo t , la concentrazione raggiunge un valore di equilibrio c_E fornito dalla seguente equazione:

$$c_E = \left(\frac{Q \cdot c_e + q \cdot c_i}{Q + q} \right)$$

Si noti che questo valore dipende dalla portata di ricambio di aria esterna Q e non dal volume V dell'ambiente. Il volume dell'ambiente interessa solo il tasso al quale c raggiunge il valore di c_E . Stabilito il valore di c_E si può ricavare, con una operazione inversa, la portata Q di aria esterna da immettere:

$$Q = q \left(\frac{c_i - c_E}{c_E - c_e} \right)$$

Se l'aria esterna di apporto è priva dell'inquinante considerato, cioè $c_e = 0$, l'espressione iniziale si semplifica in

$$c = \left(\frac{c_i}{Q/q + 1} \right) \left(1 - e^{-\left(1 + \frac{Q}{q}\right) \left(\frac{qt}{V}\right)} \right)$$

Se $q = 0$, ma è presente una concentrazione iniziale, c_0 di inquinante, il tasso di decadimento della concentrazione è dato da:

$$c = c_0 e^{-Rt}$$

Con il significato di $R = n = \frac{Q}{V}$ visto prima.

2) Inquinante rilasciato in maniera intermittente

Come si è visto, il valore di Q è indipendente dal volume V , che influisce solo il tasso al quale si raggiunge il livello di equilibrio. Questo può essere fondamentale, in particolare nelle situazioni dove l'emissione dell'inquinante avviene per brevi e limitati periodi, di lunghezza t_1 . In tal caso, se lo spazio era ventilato ad un tasso Q , calcolato secondo l'equazione del punto 1, la concentrazione cadrebbe al di sotto del valore massimo ammissibile, c_E . In linea di principio, ciò permette una riduzione del valore della ventilazione minima a un nuovo valore Q^r dato da:

$$Q^r / Q = f(Q \cdot t_1 / V)$$

L'andamento della funzione $f(Q \cdot t_1 / V)$ è visibile in Figura 2-8. Si noti che per valori della funzione inferiori a 1, teoricamente non è richiesta alcuna ventilazione. Ciò non è realizzabile in pratica poiché è improbabile che, sebbene limitato in un periodo di tempo t_1 , il contaminante non venga emesso in un secondo momento.

Questo può essere preso in considerazione considerando una regolare emissione intermittente per un periodo di lunghezza t_1 , ad intervalli di lunghezza t_2 .

Il rapporto tra il tasso di ventilazione minimo modificato Q^r e Q è quindi funzione sia del rapporto $(Q \cdot t_1 / V)$ che del rapporto r , pari a t_2 / t_1 .

In Figura 2-9 sono mostrate le curve per il calcolo di Q^r una volta forniti i parametri appena visti.

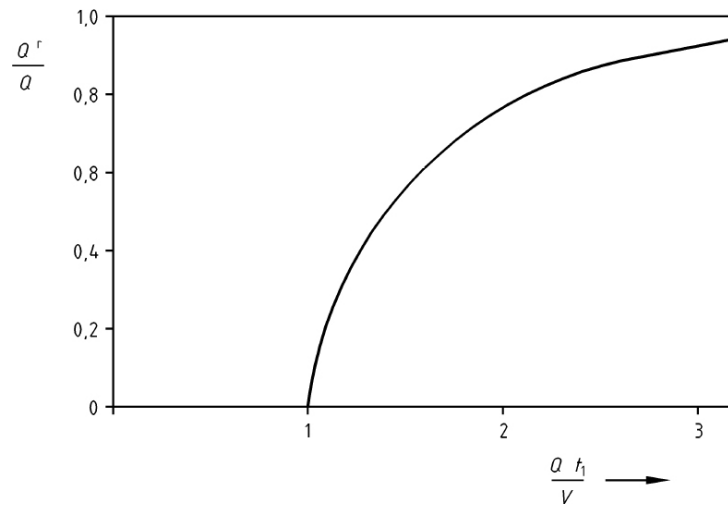


Figura 2-8 - Riduzione del tasso ammissibile quando la sorgente inquinante è presente per un periodo limitato t_1 (da CEN TR 14788:2006)

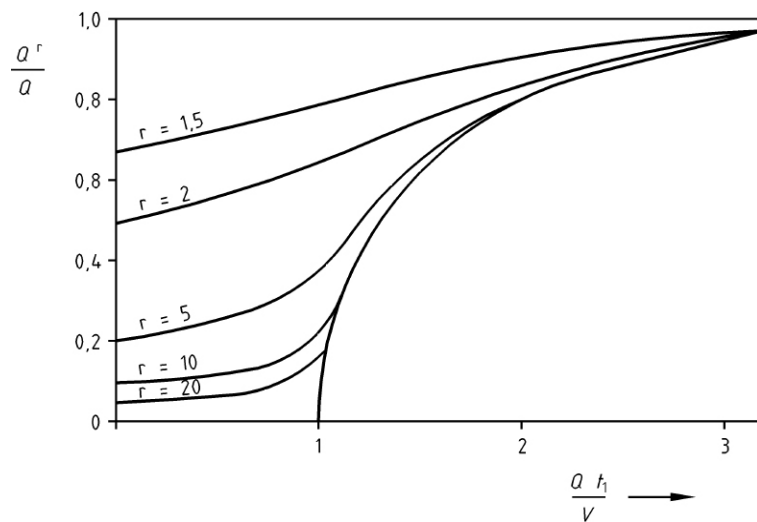


Figura 2-9 - Riduzione del tasso minimo ammissibile quando la sorgente inquinante è intermittente, continua per un periodo di tempo t_1 , con un periodo di ritorno t_2 ($r = t_2/t_1$) (da CEN TR 14788:2006)

All'allegato F la norma riporta una serie di esempi di valori di portate d'aria, impiegando le metodologie di calcolo precedentemente illustrate.

Si assume che siano presenti solo tre tipi di inquinanti:

- i) Vapore acqueo
- ii) CO_2 (dalla respirazione e dai gas della cottura)
- iii) Odori (solo per WC)

I criteri per affrontare lo studio di questi inquinanti sono:

- i) Per il vapore acqueo si ritiene accettabile la possibilità di avere la formazione di condensa occasionale nelle stanze, a condizione che l'umidità relativa UR% sulle superfici non sia eccessiva e presente per un tempo non eccessivo per

favorire la proliferazione di muffe; allo stesso modo l'umidità relativa non deve essere eccessivamente bassa per creare situazioni di discomfort (come *shock* elettrostatici e irritazione di cavità nasali, orali e agli occhi). Perciò si è deciso che l'umidità relativa non superi l'80% sulle superfici per più del 50% del tempo, né essere inferiore al 30%.

- ii) Per il diossido di carbonio la concentrazione non deve eccedere una serie di valori scelti di massima concentrazione (1000, 1500, 2000, 2500, 3500 e 5000 vppm) ma il divieto di superamento di tali valori limite in qualsiasi momento non è sempre tecnicamente realizzabile . In alcune situazioni e in alcuni climi è spesso desiderabile accettare elevati livelli di CO₂ per garantire che l'umidità interna rimanga entro limiti confortevoli per gli occupanti.
- iii) Per gli odori nei WC si è arbitrariamente scelto che la potenza dell'odore (analogamente alla concentrazione dell'inquinante) si riduca ad una certa percentuale del suo originale livello entro un determinato lasso di tempo.

Le condizioni climatiche esterne che si utilizzano nei calcoli sono:

- UR% = 100%
- Temperatura -5°C, 0°C e +10°C
- Concentrazione CO₂ = 340 vppm (Volumetric Parts per Million)

Per la valutazione del rischio di formazione di condensa e muffa si assume che l'assorbimento di vapore acqueo delle superfici nella stanza sia calcolato in accordo all'allegato C e la temperatura della faccia interna esposta della stanza, t_s , sia data dalla seguente formula

$$t_s = t_0 + 0,65(t_i - t_0)$$

dove:

t_s è la temperatura della superficie interna, °C

t_0 è la temperatura dell'aria esterna a bulbo secco, °C

t_i è la temperatura dell'aria interna a bulbo secco misurata a centro stanza, °C

Le condizioni di umidità sulle superfici possono essere determinate utilizzando la temperatura superficiale da questa equazione, le condizioni di umidità nella zona occupata e il diagramma psicrometrico (disponibile all'allegato B)

STANZA DA LETTO

Si assumono le indicazioni fornite in precedenza e le seguenti:

- Produzione di CO₂ per adulto durante il sonno: 12 l/h
- Produzione di vapore acqueo per adulto durante il sonno: 40 g/h
- Temperatura della stanza: 16 °C e 20°C
- Dimensioni della stanza: altezza 2,5 m, area 9 m²
- 2 adulti occupanti la stanza
- Aria di ventilazione proveniente dall'esterno

A. Portate di aria per la rimozione di CO₂ dalla stanza da letto

Maximum CO ₂ level at Equilibrium (vppm)	Recommended ventilation air flow rate	
	m ³ /h	dm ³ /s
1 000	36,4	10,1
1 500	20,7	5,8
2 000	14,4	4,0
2 500	10,8	3,0
3 500	6,9	1,9
5000	3,8	1,1

Tabella 2-18 - Tassi di ventilazione per la rimozione di CO₂ dalla stanza da letto (da CEN TR 14788:2006)

In tutti i casi il livello di CO₂ raggiunge il livello di equilibrio entro 8h. Per una stanza da letto di 15 m² il livello di equilibrio di 2000 vppm e oltre non si raggiungono entro 8h.

B. Portate di aria per la rimozione di vapore acqueo dalla stanza da letto

Air flow rate	Outdoor temperature -5 °C				Outdoor temperature 0 °C				Outdoor temperature +10 °C			
	Humidity		Risk?		Humidity		Risk?		Humidity		Risk?	
	m ³ /h	g/kg	% RH	Cond	Mould	g/kg	% RH	Cond	Mould	g/kg	% RH	Cond
36,4	3,8	34	N	N	5,0	44	N	N	8,8	78	N	N
20,7	4,5	40	N	N	5,6	50	N	N	9,5	83	N	Y
14,4	5,0	45	N	N	6,2	55	N	N	10,0	88	Y	Y
10,8	5,6	50	N	N	6,8	60	N	N	10,6	93	Y	Y
6,9	6,8	60	N	N	7,9	70	Y	Y	11,6	100	Y	Y
3,8	8,7	77	Y	Y	9,7	86	Y	Y	13,2	100	Y	Y

Tabella 2-19 - Portate di aria per la rimozione di vapore acqueo; temperatura interna = 16°C (da CEN TR 14788:2006)

Air flow rate	Outdoor temperature -5 °C				Outdoor temperature 0 °C				Outdoor temperature +10 °C			
	Humidity		Risk?		Humidity		Risk?		Humidity		Risk?	
	m ³ /h	g/kg	% RH	Cond	Mould	g/kg	% RH	Cond	Mould	g/kg	% RH	Cond
36,4	3,9	27	N	N	5,1	35	N	N	8,9	61	N	N
20,7	4,6	32	N	N	5,8	40	N	N	9,6	66	N	N
14,4	5,2	36	N	N	6,4	44	N	N	10,2	70	N	N
10,8	5,8	40	N	N	7,0	48	N	N	10,8	74	N	N
6,9	7,1	49	N	N	8,2	57	N	N	12,0	82	Y	Y
3,8	9,4	64	Y	Y	10,5	72	Y	Y	14,1	96	Y	Y

Tabella 2-20 - Portate di aria per la rimozione di vapore acqueo; temperatura interna = 16°C (da CEN TR 14788:2006)

SOGGIORNO

Si assumono le indicazioni fornite in precedenza e le seguenti:

- Produzione di CO₂ per adulto in attività: 18 l/h
- Produzione di vapore acqueo per adulto in attività: 45 g/h
- Produzione di vapore acqueo dalle piante: 30 g/h
- Temperatura della stanza: 20°C
- Dimensioni della stanza: altezza 2,5 m, area 20 m²
- Occupazione: soggiorno occupato da tutte le persone che vi abitano per 2 e 6h
- Numero di occupanti: 2, 4 e 6
- Aria di ventilazione proveniente dall'esterno

A. Portate di aria per la rimozione di CO₂ dal soggiorno

Maximum CO ₂ level after 2 hrs	Required ventilation air flow rate					
	2 person occupancy		4 person occupancy		6 person occupancy	
	m ³ /h	dm ³ /s	m ³ /h	dm ³ /s	m ³ /h	dm ³ /s
vppm						
1 000	45,8	12,7	107,5	29,9	163,5	45,4
1 500	11,2	3,1	55,2	15,3	90,5	25,1
2000	#	#	30,6	8,5	58,8	16,3
2500	#	#	15,1	4,2	39,7	11,0
3 500	#	#	#	#	16,4	4,6
5 000	#	#	#	#	#	#

Max CO₂ level not reached in 2 h with an air flow rate of 1 m³/h (0,3 dm³/s).

Tabella 2-21 - Portate di aria per la rimozione di CO₂ dal soggiorno; occupazione 2h (da CEN TR 14788:2006)

Maximum CO ₂ level after 6 hrs vppm	Required ventilation air flow rate					
	2 person occupancy		4 person occupancy		6 person occupancy	
	m ³ /h	dm ³ /s	m ³ /h	dm ³ /s	m ³ /h	dm ³ /s
1 000	54,5	15,1	109	30,3	163,5	45,4
1 500	30,2	8,4	62	17,2	93,0	25,8
2 000	19,6	5,4	43,1	12,0	65,0	18,1
2 500	13,3	3,7	32,6	9,1	49,8	13,8
3 500	5,5	1,5	20,9	5,8	33,5	9,3
5 000	#	#	11,5	3,2	21,3	5,9

Max CO₂ level not reached in 6 h with an air flow rate of 1 m³/h (0,3 dm³/s).

Tabella 2-22 - Portate di aria per la rimozione di CO₂ dal soggiorno; occupazione 6h (da CEN TR 14788:2006)

B. Portate di aria per la rimozione di vapore acqueo dal soggiorno

Air flow rate	Outdoor temperature -5 °C				Outdoor temperature 0 °C				Outdoor temperature +10 °C				
	Humidity		Risk?		Humidity		Risk?		Humidity		Risk?		
	m ³ /h	g/kg	% RH	Cond	Mould	g/kg	% RH	Cond	Mould	g/kg	% RH	Cond	Mould
2 person occupancy for 2 h													
45,8	3,2	22	N	N	4,4	30	N	N	8,2	56	N	N	
11,2	5,3	36	N	N	6,4	44	N	N	10,2	70	N	Y	
4 person occupancy for 2 h													
107,5	2,6	20	N	N	4,0	28	N	N	7,8	54	N	N	
55,2	3,1	22	N	N	4,3	30	N	N	8,1	56	N	N	
30,6	3,7	25	N	N	4,8	33	N	N	8,6	59	N	N	
15,1	4,9	34	N	N	6,1	42	N	N	9,9	68	N	Y	
6 person occupancy for 2 h													
163,5	2,8	19	N	N	3,9	27	N	N	7,7	53	N	N	
90,5	2,9	20	N	N	4,1	28	N	N	7,9	54	N	N	
58,8	3,2	22	N	N	4,3	30	N	N	8,1	56	N	N	
39,7	3,5	24	N	N	4,6	32	N	N	8,5	58	N	N	
16,4	5,0	35	N	N	6,2	43	N	N	10,0	69	N	Y	

Tabella 2-23 - Portate di aria per la rimozione di vapore acqueo dal soggiorno; occupazione 2h con 2,4 e 6 persone (da CEN TR 14788:2006)

Air flow rate	Outdoor temperature -5 °C				Outdoor temperature 0 °C				Outdoor temperature +10 °C				
	Humidity		Risk?		Humidity		Risk?		Humidity		Risk?		
	m ³ /h	g/kg	% RH	Cond	Mould	g/kg	% RH	Cond	Mould	g/kg	% RH	Cond	Mould
2 person occupancy for 6 h													
54,5	4,0	28	N	N	5,1	36	N	N	9,0	62	N	N	
30,2	4,8	33	N	N	6,0	41	N	N	9,8	67	N	N	
19,6	5,8	40	N	N	6,9	43	N	N	10,8	74	N	Y	
13,3	6,9	48	N	N	8,1	56	N	N	11,9	81	Y	Y	
5,5	11,2	76	Y	Y	12,2	84	Y	Y	15,8	100	Y	Y	
4 person occupancy for 6 h													
109	3,9	28	N	N	5,1	35	N	N	8,9	61	N	N	
62,0	4,7	33	N	N	5,9	40	N	N	9,7	66	N	N	
43,1	5,4	37	N	N	6,6	45	N	N	10,4	71	N	N	
32,6	6,1	43	N	N	7,2	50	N	N	11,1	76	N	N	
20,9	7,5	52	N	N	8,6	59	N	N	12,5	85	Y	Y	
11,5	10,3	71	Y	Y	11,3	78	Y	Y	15,2	100	Y	Y	
6 person occupancy for 6 h													
163,5	3,9	27	N	N	5,1	35	N	N	8,9	61	N	N	
93,0	4,7	33	N	N	5,9	41	N	N	9,7	67	N	N	
65,0	5,5	38	N	N	6,6	46	N	N	10,5	72	N	N	
49,8	6,1	42	N	N	7,3	50	N	N	11,1	76	N	N	
33,5	7,4	51	N	N	8,5	59	N	N	12,4	84	Y	N	
21,3	9,2	63	Y	N	10,4	71	Y	N	14,3	97	Y	Y	

Tabella 2-24 - Portate di aria per la rimozione di vapore acqueo dal soggiorno; occupazione 6h con 2,4 e 6 persone (da CEN TR 14788:2006)

STANZA DA BAGNO

Si assumono le indicazioni fornite in precedenza e le seguenti:

- Produzione di CO₂ non rilevante
- Produzione di vapore acqueo dalla doccia: 10 min a 3 kg/h = 500 g/doccia
- Produzione di vapore acqueo dall'asciugatura dei vestiti: 15 h a 100 g/h per persona nell'abitazione
- Temperatura della stanza: 22°C
- Dimensioni della stanza: altezza 2,5 m, superficie 6 m²
- Occupazione: ogni occupante effettua una doccia al giorno
- Numero di occupanti: 2, 4 e 6
- Si suppone che il fenomeno di condensa sia inevitabile ma che questa evapori e venga totalmente rimossa dalla ventilazione ogni giorno in un periodo di 14, 20 o 24h
- Aria estratta a 22 °C e UR = 70% o 100%
- Aria di ventilazione proveniente dall'esterno o da altre stanze (a 19 °C e UR = 50%)

A. Portate di aria per la rimozione di vapore acqueo dalla stanza da bagno

Time for removal of water vapour	Required ventilation air flow rate							
	Outdoor temperature -5 °C		Outdoor temperature 0 °C		Outdoor temperature +10 °C		Air from dwelling at 19 °C and 50 % RH ^a	
h	m ³ /h	l/s	m ³ /h	l/s	m ³ /h	l/s	m ³ /h	l/s
2 person occupancy								
14	16,8	4,7	18,3	5,1	26,1	7,2	24,2	6,7
20	11,8	3,3	12,8	3,6	18,2	5,1	16,9	4,7
24	9,8	2,7	10,7	3,0	15,2	4,2	14,1	3,9
4 person occupancy								
14	33,7	9,4	36,5	10,1	52,1	14,5	48,4	13,4
20	23,6	6,6	25,6	7,1	36,5	10,1	33,9	9,4
24	19,7	5,5	21,3	5,9	30,4	8,4	28,2	7,8
6 person occupancy								
14	50,5	14,0	54,8	15,2	78,2	21,7	72,6	20,2
20	35,4	9,8	38,3	10,7	54,7	15,2	50,8	14,1
24	29,5	8,2	32,0	8,9	45,6	12,7	42,3	11,7

^a Not possible with outside air at 100 % RH and temperature greater than 8 °C.

Tabella 2-25 - Portate d'aria per la rimozione di vapore acqueo dalla stanza da bagno
Aria estratta a 100% RH e a 22°C (da CEN TR 14788:2006)

Time for removal of water vapour	Required ventilation air flow rate							
	Outdoor temperature -5 °C		Outdoor temperature 0 °C		Outdoor temperature +10 °C		Air from dwelling at 19 °C and 50 % RH ^a	
h	m ³ /h	l/s	m ³ /h	l/s	m ³ /h	l/s	m ³ /h	l/s
2 person occupancy								
14	26,5	7,3	30,1	8,4	59,5	16,5	50,7	14,1
20	18,5	5,1	21,1	5,9	41,7	11,6	35,5	9,9
24	15,4	4,3	17,6	4,9	34,7	9,6	29,6	8,2
4 person occupancy								
14	52,9	15,0	60,3	16,8	119,0	33,0	101,3	28,1
20	37,0	10,3	42,2	11,7	83,3	23,3	70,9	19,7
24	30,9	8,6	35,2	9,8	69,4	19,3	59,1	16,4
6 person occupancy								
14	79,4	22,0	90,4	25,1	178,6	49,6	152,0	42,2
20	55,6	15,4	63,3	17,6	125,0	34,7	106,4	29,6
24	46,3	12,9	52,7	14,6	104,2	28,9	88,7	24,6

^a Not possible with outside air at 100 % RH and temperature greater than 8 °C.

Tabella 2-26 - Portate d'aria per la rimozione di vapore acqueo dalla stanza da bagno
Aria estratta a 70% RH e a 22°C (da CEN TR 14788:2006)

WC

Si assume che:

- Gli odori siano prodotti come un inquinante con un tasso di 2l/s per 1 min
- Gli odori debbano essere ridotti del 10,20,30,40,50,60% della loro iniziale concentrazione entro 15 min per ogni uso del WC
- Dimensioni: altezza 2,5 m, superficie 3 m²
- Assenza di odori nell'aria in ingresso

% of initial concentration after 15 min	10 %	20 %	30 %	40 %	50 %	60 %
Air flow rate, dm ³ /s	19,3	13,5	10,1	7,6	5,8	4,3

Tabella 2-27 - Portate di aria per la rimozione di odori dal WC (da CEN TR 14788:2006)

2.3.4 Ventilazione e risparmio energetico

Il tema del risparmio energetico è, oggi più che mai, di straordinaria importanza, soprattutto alla luce delle ultime indicazioni contenute nella nuova versione dell'EPBD, la Direttiva 2010/31/UE. Si rafforza la necessità di aumentare l'efficienza energetica all'interno dell'Unione Europea per conseguire l'ambizioso obiettivo di ridurre del 20% il consumo energetico entro il 2020: obiettivo primario è che entro il 31 dicembre 2020 tutti gli edifici di nuova costruzione siano ad energia quasi zero, anticipando al 31 dicembre 2018 questa regola per gli edifici di proprietà di enti pubblici. In tutto ciò gioca un ruolo fondamentale la ventilazione ma soprattutto la qualità dell'aria interna, fattore di crescente importanza.

La norma UNI EN 12831:2006 si occupa di calcolare le potenze di picco per il dimensionamento degli impianti, mentre il calcolo dei fabbisogni energetici degli edifici è sviluppato nelle normative UNI EN ISO 13790:2008 e la serie delle specifiche tecniche UNI TS 11300 (in particolare la UNI TS 11300-1, attualmente in revisione, basata sulla UNI EN ISO 13790).

2.3.4.1 UNI EN 12831

Come detto questa norma fornisce i metodi di calcolo delle dispersioni termiche di progetto e del carico termico in condizioni di progetto. Può essere utilizzata per tutti gli edifici con altezza interna non maggiore di 5 m, ipotizzati in regime termico stazionario.

Al paragrafo 7.2 la norma fornisce il metodo di calcolo della dispersione termica di progetto per ventilazione $\Phi_{v,i}$, per uno spazio riscaldato (i)

$$\Phi_{v,i} = H_{v,i} \times (\theta_{int,i} - \theta_e) \quad [W]$$

dove:

$$H_{v,i} = \text{coefficiente di dispersione termica di progetto per ventilazione} \left[\frac{W}{K} \right]$$

$$\theta_{int,i} = \text{temperatura interna di progetto dello spazio riscaldato (i)} [K]$$

θ_e = temperatura esterna di progetto [K]

Il coefficiente di dispersione termica di progetto per ventilazione, $H_{v,i}$, di uno spazio riscaldato (i) viene calcolato come:

$$H_{v,i} = \dot{V}_i \times \rho \times c_p \quad \left[\frac{W}{K} \right]$$

dove:

$$\dot{V}_i = \text{portata d'aria dello spazio riscaldato i-esimo} \quad \left[\frac{m^3}{s} \right]$$

$$\rho = \text{densità dell'aria a } \theta_{\text{int},i} \quad \left[\frac{kg}{m^3} \right]$$

$$c_p = \text{capacità termica dell'aria a } \theta_{\text{int},i} \quad \left[\frac{kJ}{kgK} \right]$$

Assumendo costanti i valori di ρ e c_p l'equazione di prima si semplifica in

$$H_{v,i} = 0,34 \times \dot{V}_i \quad \left[\frac{W}{K} \right]$$

con

$$\dot{V}_i \text{ espresso in } \left[\frac{m^3}{h} \right]$$

La norma distingue quindi la procedura di calcolo della portata d'aria per il volume riscaldato in relazione alla presenza o meno di sistema di ventilazione meccanica.

Senza sistema di ventilazione

In assenza di sistemi di ventilazione, si suppone che l'aria di rinnovo abbia le caratteristiche termiche dell'aria esterna. Pertanto, la dispersione termica è proporzionale alla differenza tra la temperatura interna di progetto e la temperatura dell'aria esterna.

Il valore della portata d'aria dello spazio riscaldato i-esimo, utilizzato per il calcolo del coefficiente di dispersione termica di progetto per ventilazione, è pari a

$$\dot{V}_i = \max(\dot{V}_{\text{inf},i}, \dot{V}_{\text{min},i})$$

dove:

$\dot{V}_{inf,i}$ = portata d'aria per infiltrazione, dovuta al flusso d'aria attraverso le fessure e le giunzioni nell'involucro dell'edificio

$\dot{V}_{min,i}$ = portata d'aria minima richiesta per ragioni igieniche

Con sistema di ventilazione

Se è presente un sistema di ventilazione, l'aria di rinnovo non deve necessariamente avere le caratteristiche termiche dell'aria esterna, ad esempio quando si utilizza un recuperatore di calore o quando l'aria viene preriscaldata; in questi casi si tiene conto della differenza di temperatura tra l'aria di rinnovo e quella esterna di progetto, applicando un fattore di riduzione.

La portata d'aria dello spazio riscaldato i-esimo vale:

$$\dot{V}_i = \dot{V}_{inf,i} + \dot{V}_{su,i} \times (f_{v,i} + \dot{V}_{mech,inf,i}) \quad \left[\frac{m^3}{h} \right]$$

dove:

$$\dot{V}_{inf,i} = \text{portata d'aria per infiltrazione dello spazio riscaldato i-esimo} \quad \left[\frac{m^3}{h} \right]$$

$$\dot{V}_{su,i} = \text{portata d'aria di rinnovo dello spazio riscaldato i-esimo} \quad \left[\frac{m^3}{h} \right]$$

$\dot{V}_{mech,inf,i}$ = portata d'aria di estrazione in eccesso dello spazio riscaldato i-esimo calcolata

secondo il punto 7.2.3.2 della norma $\left[\frac{m^3}{h} \right]$

$f_{v,i}$ = fattore di riduzione della temperatura, dato da:

$$f_{v,i} = \frac{\theta_{int,i} - \theta_{su,i}}{\theta_{int,i} - \theta_e}$$

$\theta_{su,i}$ = temperatura dell'aria immessa nello spazio riscaldato i-esimo [$^{\circ}C$]

La portata di estrazione in eccesso è sostanzialmente non nulla quando la portata di estrazione è maggiore di quella immessa. La norma rimanda alla UNI EN 13465 (sostituita dalla UNI EN 15242) per il metodo di calcolo preciso delle portate d'aria negli edifici, ma propone comunque metodi semplificati al paragrafo 7.2.2 e 7.2.3

Igiene – portata d'aria minima

Per ragioni di igiene è richiesta una portata di aria minima; quando non sono disponibili informazioni nazionali, la portata d'aria minima, $\dot{V}_{\min,i}$, di uno spazio riscaldato (i), può essere determinata con la seguente:

$$\dot{V}_{\min,i} = n_{\min} \times V_i$$

dove:

n_{\min} = tasso minimo orario di ventilazione esterna $[h^{-1}]$

V_i = volume dello spazio riscaldato (i), calcolato in base alle dimensioni interne $[m^3]$

Se non vi sono indicazioni a livello nazionale la norma suggerisce di fare riferimento ad alcuni dati del CR 1752, anche se oggi si deve ritenere più attendibile il riferimento alla UNI EN 15251, pubblicata dopo la UNI EN 12831. Questa rimanda comunque alla propria appendice D, in particolare al prospetto D.6 (Tabella 2-28) dove si suggeriscono i tassi minimi di ventilazione esterna n_{\min} .

Tipo di ambiente	n_{\min} h^{-1}
Ambiente abitabile (predefinito)	0,5
Cucina o bagno con finestra	1,5
Ufficio	1,0
Sala riunioni, aula scolastica	2,0

Tabella 2-28 - Tasso minimo di ventilazione esterna, n_{\min} (da UNI EN 12831:2006)

Questi valori sono basati sulle dimensioni interne; se nel calcolo si utilizzano le dimensioni esterne, i valori devono essere moltiplicati per il rapporto tra il volume interno

e il volume esterno dello spazio (solitamente 0,8). Se sono presenti dei caminetti aperti è opportuno tenere conto dei maggiori tassi di ventilazione richiesti per l'aria comburente.

Infiltrazione attraverso l'involucro dell'edificio – portata d'aria

Il paragrafo 7.2.2 propone un metodo di calcolo per valutare le infiltrazioni attraverso l'involucro edilizio in maniera analoga a quanto avveniva nella UNI EN 832, che però è stata ritirata. Viene proposta la seguente:

$$\dot{V}_{\text{inf},i} = 2 \times V_i \times n_{50} \times e_i \times \varepsilon_i \quad \left[\frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right]$$

dove:

n_{50} = tasso orario di ventilazione risultante da una differenza di pressione di 50 Pa tra l'interno e l'esterno dell'edificio, compresi gli effetti delle prese d'aria $[h^{-1}]$

e_i = coefficiente di schermatura

ε_i = fattore di correzione per l'altezza, che tiene conto della maggiore velocità del vento all'aumentare dell'altezza dello spazio dal livello del suolo

Nell'equazione sopra viene introdotto il fattore 2 in quanto il valore di n_{50} è dato per l'intero edificio. Il calcolo deve considerare il caso più sfavorevole, vale a dire quando tutta l'aria penetra per infiltrazione da un unico lato dell'edificio.

Per i valori di n_{50} , e_i e ε_i , qualora non siano disponibili dati nazionali, si possono applicare quelli forniti all'appendice D (Tabella 2-29, Tabella 2-30 e Tabella 2-31)

Costruzione	n_{50} h ⁻¹		
	Grado di tenuta all'aria dell'involucro dell'edificio (qualità della tenuta delle finestre)		
	alto (alta qualità della tenuta di porte e finestre)	medio (finestre a doppio vetro, tenuta normale)	basso (finestre a vetro singolo, senza sigillante)
abitazioni unifamiliari	<4	4 - 10	>10
altre abitazioni o edifici	<2	2 - 5	>5

Tabella 2-29 - Tassi di ventilazione per l'intero edificio, n_{50} (secondo UNI EN 12831:2006)

Classe di schermatura	<i>e</i>		
	Spazio riscaldato senza aperture esposte	Spazio riscaldato con un'apertura esposta	Spazio riscaldato con più di un'apertura esposta
Nessuna schermatura (edifici in zone ventose, edifici alti in centri cittadini)	0	0,03	0,05
Schermatura media (edifici in campagna con alberi o altri edifici attorno, periferia)	0	0,02	0,03
Forte schermatura (edifici di media altezza in centri cittadini, edifici in zone boschive)	0	0,01	0,02

Tabella 2-30 - Coefficiente di schermatura *e* (da UNI EN 12831:2008)

Altezza dello spazio riscaldato al di sopra del livello del suolo (altezza del centro della stanza dal livello del suolo)	<i>ε</i>
0 - 10 m	1,0
>10 - 30 m	1,2
>30 m	1,5

Tabella 2-31 - Fattore di correzione per l'altezza *ε* (da UNI EN 12831:2006)

2.3.4.2 UNI EN ISO 13790:2008

Questa norma europea permette di calcolare il fabbisogno di energia per il riscaldamento e il raffrescamento di ambienti di edifici residenziali e non. Vengono presentati metodi di calcolo di tipo semplificato (mensile o stagionale) o anche più accurati (orari) utilizzando profili d'utenza come temperature di regolazione, ecc..

Il paragrafo 7.2.1.1 introduce il calcolo, secondo il metodo mensile o stagionale per il fabbisogno di energia termica per il riscaldamento continuo che, per ciascuna zona dell'edificio è indicato dall'equazione:

$$Q_{H,nd} = Q_{H,ht} - \eta_{H,gn} Q_{H,gn} \quad [MJ]$$

dove:

$$Q_{H,nd} = \text{fabbisogno di energia termica dell'edificio per riscaldamento} \quad [MJ]$$

$$Q_{H,ht} = \text{scambio termico totale nella modalità di riscaldamento} \quad [MJ]$$

$$Q_{H,gn} = \text{apporti termici totali nella modalità di riscaldamento} \quad [MJ]$$

$\eta_{H,gn}$ = fattore adimensionale di utilizzazione degli apporti

Analogamente il fabbisogno di energia termica per il raffrescamento continuo è dato da (par. 7.2.1.2)

$$Q_{C,nd} = Q_{C,gn} - \eta_{C,ls} Q_{C,ht} \quad [MJ]$$

dove:

$Q_{C,nd}$ = fabbisogno di energia termica dell'edificio per raffrescamento [MJ]

$Q_{C,ht}$ = scambio termico totale nella modalità di raffrescamento [MJ]

$Q_{C,gn}$ = apporti termici totali nella modalità di raffrescamento [MJ]

$\eta_{C,ls}$ = fattore adimensionale di utilizzazione delle dispersioni termiche

Il contributo della ventilazione è incluso nel termine $Q_{H,ht}$ (e $Q_{C,ht}$) che risulta essere composto da due termini, uno riferito allo scambio termico per trasmissione e uno per ventilazione secondo l'equazione

$$Q_{ht} = Q_{tr} + Q_{ve} \quad [MJ]$$

dove:

Q_{tr} = scambio termico totale per trasmissione [MJ]

Q_{ve} = scambio termico totale per ventilazione [MJ]

Il punto 9 della norma definisce lo scambio termico per ventilazione e in particolare il paragrafo 9.2 si riferisce al metodo stagionale o mensile per cui risulta (nel solo caso di riscaldamento):

$$Q_{ve} = H_{ve,adj} \cdot (\theta_{int,set,H,z} - \theta_e) \cdot t \quad [MJ]$$

dove (per ciascuna zona dell'edificio z):

$H_{ve,adj}$ = coefficiente globale di scambio termico per ventilazione, corretto per la

differenza di temperatura interna-esterna (se applicabile) $\left[\frac{W}{K} \right]$

$\theta_{\text{int, set, H}}$ = temperatura di regolazione per il riscaldamento della zona [K]

θ_e = temperatura dell'ambiente esterno [K]

t = durata del passo di calcolo⁷ [Ms]

Il valore del coefficiente globale di scambio termico per ventilazione $H_{\text{ve,adj}}$ è calcolato come indicato dalla seguente equazione

$$H_{\text{ve,adj}} = \rho_a c_a \left(\sum_k b_{\text{ve,k}} q_{\text{ve,k,mn}} \right)$$

dove:

$$\rho_a c_a = \text{capacità termica volumica dell'aria} = 1200 \left[\frac{\text{J}}{\text{m}^3 \text{K}} \right]$$

$$q_{\text{ve,k,mn}} = \text{portata d'aria mediata sul tempo del flusso d'aria } k \left[\frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right]$$

$b_{\text{ve,k}}$ = fattore di correzione della temperatura per il flusso di aria k , con valore $b_{\text{ve,k}} \neq 1$ se la temperatura dell'aria immessa, $\theta_{\text{sup,k}}$, non è uguale alla temperatura dell'ambiente esterno, come nel caso di pre-riscaldamento, pre-raffrescamento o recupero termico

k = ciascun flusso di aria pertinente, come l'infiltrazione, la ventilazione naturale o meccanica e/o la ventilazione aggiuntiva per il raffrescamento notturno.

La portata d'aria mediata sul tempo del flusso d'aria k , $q_{\text{ve,k,mn}}$ è calcolata secondo la seguente

$$q_{\text{ve,k,mn}} = f_{\text{ve,t,k}} q_{\text{ve,k}} \left[\frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right]$$

dove:

⁷ Facendo riferimento al metodo stagionale per un edificio sito in zona climatica E (ad es. Bologna), il passo di calcolo coincide con il periodo di riscaldamento convenzionale, dal 15 ottobre al 15 aprile

$q_{ve,k}$ = portata d'aria del flusso d'aria k $\left[\frac{m^3}{s} \right]$

$f_{ve,t,k}$ = frazione di tempo in cui si verifica il flusso d'aria k , calcolata come la frazione del numero di ore al giorno (per tempo continuo⁸ $f_{ve,t,k} = 1$), determinata dalla stessa sorgente di $q_{ve,k}$

Nel caso in cui sia presente un'unità di recupero termico, il fattore di correzione della temperatura, $b_{ve,k}$, per flusso d'aria è uguale a:

$$b_{ve,k} = (1 - f_{ve,frac,k} \times \eta_{hru})$$

dove:

η_{hru} = efficienza dell'unità di recupero termico

$f_{ve,frac,k}$ = frazione del flusso di aria k considerato che attraversa l'unità di recupero termico

2.3.4.3 UNI TS 11300-1:2008

La specifica tecnica UNI TS 11300-1:2008 (“*Determinazione del fabbisogno di energia termica dell’edificio per la climatizzazione estiva ed invernale*”) definisce le modalità per l’applicazione nazionale della UNI EN ISO 13790:2008 con riferimento al metodo mensile per il calcolo dei fabbisogni di energia termica per riscaldamento e raffrescamento. In fase di revisione, è comunque di valore cogente, ai sensi del DPR 59/09.

Il capitolo 12 della norma si occupa della ventilazione; in particolare il paragrafo 12.1 “*Portata di ventilazione*” suddivide la trattazione in due parti.

⁸ Per i metodi mensile e stagionale nel caso di riscaldamento o raffrescamento intermittente dove l’effetto dell’intermittenza è tenuto in considerazione mediante un fattore di riduzione del fabbisogno di energia termica per il riscaldamento o il raffrescamento, la frazione di tempo è calcolata assumendo riscaldamento o raffrescamento continuo, ignorando i giorni con valore di regolazione per riscaldamento o per raffrescamento ridotto oppure spegnimento.

La prima parte riguarda il calcolo di progetto o standard (utilizzato per redigere la Certificazione Energetica), per il quale, nel caso di aerazione o ventilazione naturale:

- per gli edifici residenziali e per gli edifici adibiti ad attività industriali ed artigianali si assume un tasso di ricambio d'aria pari a 0,3 vol/h;
- per tutti gli altri edifici si assumono i tassi di ricambio d'aria riportati nella UNI 10339. I valori degli indici di affollamento sono assunti pari al 60% di quelli riportati nella suddetta norma ai fini della determinazione della portata di progetto.

Per gli edifici dotati invece di sistemi di ventilazione meccanica a semplice flusso (aspirazione) il tasso di ricambio d'aria è fissato pari a:

$$q_{ve} = q_{ve,des} \times k$$

dove:

$q_{ve,des}$ = portata d'aria di progetto

k = coefficiente di contemporaneità di utilizzo delle bocchette aspiranti.

In assenza di dati precisi si può assumere $k = 1$ per sistemi a portata fissa e $k = 0,6$ per sistemi a portata variabile.

Per gli edifici dotati di sistemi di ventilazione meccanica a doppio flusso il tasso di ricambio d'aria è fissato pari a:

$$q_{ve} = q_{ve,des} \times k \times (1 - \eta_{ve})$$

dove:

$q_{ve,des}$ = portata d'aria di progetto del sistema per ventilazione meccanica,

η_{ve} = fattore di efficienza dell'eventuale recuperatore di calore dell'aria (pari a 0 se assente).

La seconda parte riguarda la “valutazione adattata all’utenza” in cui si afferma che per scopi differenti da quelli di progetto o standard (cioè di valutazione dei fabbisogni energetici), è possibile effettuare una determinazione della portata di ventilazione tenendo conto anche dei requisiti relativi alla qualità dell’aria interna. La norma specifica che nel

caso di aerazione e di ventilazione naturale non è possibile determinare con certezza le portate di rinnovo in quanto il tasso di ricambio d'aria di un edificio dipende da diversi fattori: condizioni climatiche al contorno (velocità, direzione del vento e differenza di temperatura tra interno e esterno), permeabilità dell'involucro e comportamento dell'utenza. I valori che si ottengono possono essere quindi notevolmente diversi da quelli indicati per la valutazione di progetto o standard.

Ai fini della determinazione della portata di ventilazione richiesta per soddisfare l'esigenza di qualità dell'aria interna la norma rimanda alle UNI EN 13779 (per edifici non residenziali) e UNI EN 15251 mentre per un calcolo dettagliato della portata di ventilazione rimanda alla UNI EN 15242.

Il paragrafo 12.2 tratta la ventilazione notturna (*"free cooling"*), il cui effetto viene valutato secondo quanto riportato nel punto 9.4.3 della UNI EN ISO 13790:2008.

La versione tuttora in fase di revisione si presenta strettamente correlata alla UNI 10339 che a breve dovrebbe entrare in inchiesta pubblica.

In particolare, al paragrafo 12.1, per il calcolo della portata di ventilazione media mensile si fa riferimento alla UNI 10339, mentre per gli edifici residenziali (categoria E.1) la portata minima di progetto di aria esterna, $q_{ve,0}$ è espressa da:

$$q_{ve,0} = \frac{n \cdot V}{3600}$$

dove:

n = tasso di ricambio d'aria $[h^{-1}]$

V = volume netto della zona termica considerata $[m^3]$

La norma sottolinea poi come, nel paragrafo 12.2, per gli stessi edifici, la portata minima di progetto di aria esterna, $q_{ve,0}$, si debba calcolare secondo l'equazione vista sopra, assumendo un tasso di ricambio d'aria di progetto pari a $0,5 h^{-1}$.

All'inizio dello stesso paragrafo si sottolinea che nelle condizioni di riferimento, ovvero per ventilazione per sola aerazione, la portata media giornaliera mensile $q_{ve,k,mn}$, deve essere calcolata secondo la seguente formula:

$$q_{ve,k,mn} = q_{ve,0,k} \times f_{ve,t,k} \quad \left[\frac{m^3}{s} \right]$$

dove:

$$q_{ve,0,k} = \text{portata minima di progetto di aria esterna} \quad \left[\frac{m^3}{s} \right]$$

$f_{ve,t,k}$ = fattore di correzione che rappresenta la frazione di tempo in cui si attua il flusso d'aria k -esimo e che tiene conto dell'effettivo profilo di utilizzo e delle infiltrazioni che si hanno quando non si opera l'aerazione.

I valori di quest'ultimo fattore sono riportati, nella norma, nel prospetto E.2 in funzione della destinazione d'uso. Per le abitazioni civili risulta $f_{ve,t,k} = 0,6$ per cui si ricava

$$q_{ve,k,mn} = \frac{0,5 \cdot V}{3600} \times 0,6 = \frac{0,3 \cdot V}{3600}$$

In sostanza nulla cambia rispetto ai valori di ricambi orari proposti dalla 11300 tuttora in vigore ($n = 0,3 \text{ h}^{-1}$).

2.3.5 Ventilazione e sicurezza degli impianti: la norma UNI 7129-2:2008

Il tema della ventilazione è trattato anche nella UNI 7129-2:2008 che rappresenta la normativa di riferimento nel campo della progettazione, installazione e collaudo degli apparecchi a gas per uso domestico. Essa può essere applicata all'installazione di apparecchi aventi singola portata termica nominale massima non maggiore di 35 kW e alla realizzazione della ventilazione e/o aerazione dei locali di installazione.

La norma riporta inizialmente una serie di definizioni:

- *Apparecchio di Tipo A*: apparecchio non previsto per il collegamento a camino/canna fumaria o a dispositivo di evacuazione dei prodotti della combustione all'esterno del locale in cui l'apparecchio è installato. Il prelievo dell'aria comburente e l'evacuazione dei prodotti della combustione avvengono nel locale di installazione.
- *Apparecchio di Tipo B*: apparecchio previsto per il collegamento a camino/canna fumaria o a dispositivo che evacua i prodotti della combustione all'esterno del locale in cui l'apparecchio è installato. Il prelievo dell'aria comburente avviene nel locale di installazione e l'evacuazione dei prodotti della combustione avviene all'esterno del locale stesso
- *Apparecchio di Tipo C*: apparecchio il cui circuito di combustione (prelievo dell'aria comburente, camera di combustione, scambiatore di calore e evacuazione dei prodotti della combustione) è a tenuta rispetto al locale in cui l'apparecchio è installato. Il prelievo dell'aria comburente e l'evacuazione dei prodotti della combustione avvengono direttamente all'esterno del locale.
- *Ventilazione*: Afflusso dell'aria necessaria alla combustione
- *Aerazione*: Ricambio dell'aria necessaria sia per lo smaltimento dei prodotti della combustione, sia per evitare miscele con un tenore pericoloso di gas non combustibili. (definizione differente da quella proposta dalla UNI EN 12792:2005 la quale specificava che per aerazione si intende una “*ventilazione naturale per mezzo dell'apertura delle finestre*”; nel prosieguo di questa tema si farà quindi riferimento alla definizione riportata dalla UNI 7129-2:2008)

2.3.5.1 Tipologie di apparecchi

Apparecchi di tipo A

Gli apparecchi di tipo A sono apparecchi di piccola potenza a cui appartengono gli scaldacqua istantanei di portata termica utile fino a 11 kW, gli apparecchi ad accumulo fino ad una capacità utile di 50 l di acqua ed una portata termica di 4,65 kW, gli apparecchi indipendenti per il riscaldamento ambientale sino ad una portata termica di 3,5 kW e tutti gli altri apparecchi a gas aventi una portata termica fino a 2,9 kW, esclusi gli apparecchi di cottura (Gallizio, 1994).

Il punto 4.2.7 della norma sottolinea come sia vietata l'installazione di apparecchi di tipo A:

- 1) Nei locali uso bagno, camere da letto e monolocali
- 2) Nei locali con volumetria minore di $1,5 \text{ m}^3/\text{kW}$ di portata termica installata e minore di 12 m^3
- 3) In un unico locale, se la portata termica nominale complessiva dei medesimi è maggiore di 15 kW

Il locale di installazione di un apparecchio di tipo A deve essere sempre aerato e ventilato solamente in maniera diretta; a tal fine devono essere obbligatoriamente realizzate nel locale stesso due aperture permanenti rivolte verso l'ambiente esterno.

- Una prima apertura, destinata alla aerazione del locale di installazione, deve essere posizionata in prossimità del soffitto, con filo inferiore ad un'altezza comunque non minore di 1,80 m dal pavimento e deve avere una sezione netta almeno pari a 100 cm^2
- Una seconda apertura⁹, destinata alla ventilazione del locale, deve essere posizionata in prossimità del pavimento, con filo inferiore ad una altezza comunque non maggiore di 300 mm dal pavimento stesso e deve avere sezione netta almeno pari a 100 cm^2 .

Le aperture devono soddisfare i seguenti requisiti:

- Devono essere protette sia nella zona di ingresso che nella zona di uscita dell'aria mediante griglie o reti metalliche senza ridurre la sezione utile netta

⁹ Se il combustibile utilizzato ha una densità relativa maggiore di 0,8, la seconda apertura posta in prossimità del pavimento può assolvere anche alla funzione di smaltimento di eventuali fughe di gas.

- Devono essere realizzate in modo da rendere possibili le operazioni di manutenzione ordinaria e straordinaria

Assicurando la ventilazione del locale di installazione attraverso una o più aperture di ventilazione è necessario che abbiano, ciascuna, una sezione utile netta non minore di 100 cm² e che la somma delle sezioni nette di tali aperture, realizzate nel locale di installazione o, se consentito, in locale per l'aria comburente, deve essere non minore della sezione utile netta calcolata come al paragrafo 3.3.5.3.

Apparecchi di tipo B

E' vietata l'installazione di apparecchi di tipo B nei locali adibiti a camera da letto e ad uso bagno, così come in ambienti in cui siano presenti generatori di calore a legna (o combustibili solidi in genere) e in locali ad essi adiacenti e comunicanti (disposizione valida solo se gli apparecchi alimentati da combustibile solido non sono caratterizzati da un focolare di tipo stagno rispetto all'ambiente in cui sono installati).

Il locale di installazione degli apparecchi di tipo B deve essere sempre ventilato, inoltre deve essere aerato o aerabile.

La ventilazione può essere ottenuta in maniera diretta o indiretta. L'apertura di ventilazione può essere posizionata a qualsiasi quota rispetto al livello del pavimento. Per gli apparecchi di tipo B alimentati da gas combustibile avente densità relativa $\geq 0,8$, devono essere posizionate ad una altezza non maggiore di 300 mm dal pavimento. Per il dimensionamento delle aperture si veda il paragrafo 3.3.5.3. Assicurando la ventilazione del locale di installazione attraverso una o più aperture di ventilazione è necessario che:

- Abbiano, ciascuna, una sezione utile netta non minore di 100 cm²
- La somma delle sezioni nette di tali aperture, realizzate nel locale di installazione o, se consentito, in locale per l'aria comburente, deve essere non minore della sezione utile netta calcolata come al paragrafo 3.3.5.3.

Qualora si utilizzi un condotto di ventilazione o condotti collettivi è opportuno che la canalizzazione:

- Sia impermeabile ai fumi e ai gas
- Sia priva di cambi di direzione a spigoli vivi
- Abbia una sezione netta almeno pari a 1,5 la sezione netta prevista nel caso di apertura di ventilazione non canalizzata e comunque non minore di 150 cm²

- Sia comunque collegata a parete rivolta verso l'esterno di un locale adiacente al locale di installazione

Apparecchi di tipo C

Il locale di installazione di un apparecchio di tipo C non richiede aperture di ventilazione. In ogni caso si richiede che il locale sia aerabile o aerato in maniera diretta purché le aperture:

- Siano tutte realizzate nel locale di installazione
- Abbiano, ognuna di esse una superficie utile netta non minore di 100 cm²

Apparecchi di cottura

Si tratta di apparecchi destinati alla cottura dei cibi che possono essere alimentati a gas o ad energia elettrica: i piani di cottura, i forni, le friggitrici, piastre di cottura, ecc.

Nel corso della cottura¹⁰ dei cibi si forma principalmente vapore acqueo, anidride carbonica, particelle liquide e solide (le più piccole, dell'ordine tra 0,01 e 3 µm sono il frutto della ricondensazione dei vapori di grasso) ma anche ossido di azoto (NO), dalla fiamma, che può dar luogo a formazione di biossidi di azoto e ozono nocivi per la salute (si rimanda al capitolo I). Perciò il locale di installazione di un apparecchio di cottura deve essere sempre aerato e ventilato. L'aerazione necessaria può essere ottenuta mediante l'installazione di uno dei seguenti sistemi:

- 1) Cappa a tiraggio naturale collegata mediante un canale di esalazione ad un condotto o canna fumaria per vapori di cottura o direttamente all'esterno
- 2) Cappa aspirante elettrica (munita di ventilatore) collegata mediante un canale di esalazione ad un condotto per vapori di cottura o direttamente all'esterno. La cappa è da mettere in funzione per tutto il tempo di funzionamento dell'apparecchio.

¹⁰ I tassi di ventilazione indicati dalla UNI EN 15251 sono sufficienti a fornire la quantità d'aria necessaria ai fini della combustione, infatti occorrono circa 10 m³/h di aria comburente per 1 m³/h di metano, cioè per una potenza termica pari a circa 9,5 kW (essendo la potenza complessiva dei piani di cottura a gas ad uso residenziale non superiore solitamente a 10 kW).

- 3) Elettroventilatore collocato sulla parte alta di una parete del locale di installazione (su serramenti e/o infissi rivolti verso l'esterno), oppure collegato ad un condotto di esalazione, ad uso proprio. L'elettroventilatore è da mettere in funzione per tutto il tempo di funzionamento degli apparecchi di cottura
- 4) Aerazione di tipo diretto secondo quanto indicato al paragrafo 3.3.5.2

L'aerazione di tipo diretto è consentita purché:

- La portata termica nominale complessiva degli apparecchi di cottura non sia maggiore di 11,7 kW
- La portata termica nominale massima complessiva riferita agli apparecchi di tipo A e agli apparecchi di cottura installati nello stesso locale non sia superiore a 15 kW

A livello progettuale, la portata di aria di ricambio della cappa o dell'elettroventilatore deve essere pari ad almeno $1,72 \text{ m}^3/\text{h}$ per ogni kW riferito alla portata termica nominale massima complessiva degli apparecchi di cottura compresi nel locale di installazione.

2.3.5.2 Tipologie di ventilazione

Ventilazione e/o aerazione diretta

La ventilazione e l'aerazione diretta possono essere realizzate tramite aperture permanenti, rivolte verso l'esterno, nel locale di installazione degli apparecchi, come visibile in Figura 2-10.

In alternativa:

- a) L'aerazione diretta può essere realizzata anche mediante condotti singoli o collettivi, facenti parte di un sistema integrato e progettato di ventilazione naturale per soddisfare sia le esigenze di aerazione sia per il ricambio d'aria degli ambienti. Nel caso di sistema di ricambio dell'aria controllato mediante dispositivi meccanici, una avaria dell'organo di estrazione e/o immissione dell'aria, non deve impedire la corretta aerazione nei locali di installazione, ai fini della sicurezza degli impianti alimentati con combustibile gassoso.
- b) La ventilazione diretta può essere realizzata anche mediante condotti singoli, collettivi o attraverso sistemi di ventilazione meccanica controllata (VMC) a

semplice o doppio flusso (quest'ultima non è ammessa in presenza di apparecchi di tipo A e B).

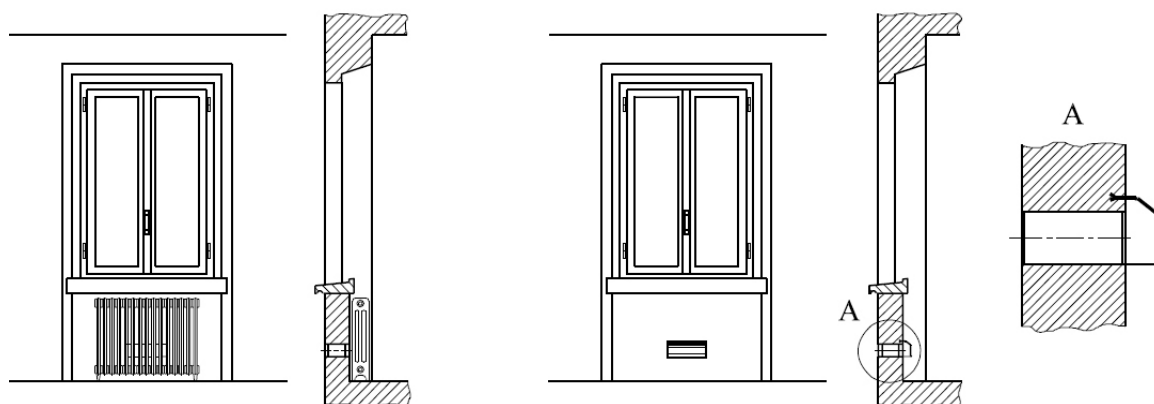


Figura 2-10 - Esempi di realizzazione di aperture di ventilazione diretta (da UNI 7129-2:2008)

Per quanto riguarda i sistemi di ventilazione meccanica, il paragrafo B.2 specifica come se ne possano individuare due tipi:

- Sistemi a semplice flusso per estrazione (Figura 2-11), costituiti da un unico ventilatore a funzionamento continuo a cui confluisce sia l'aria viziata dai locali "sporchi" (bagni e cucina) sia i prodotti della combustione dell'eventuale apparecchio di cottura con sorveglianza di fiamma (cioè con chiusura automatica dell'erogazione di gas in caso di spegnimento della fiamma, ad esempio per trascinamento di una pentola o per una corrente d'aria) dotato di cappa priva di proprio ventilatore e da opportuni dispositivi di tipo autoregolante o igroregolabile che richiamano aria dai locali "nobili" (soggiorno e camere da letto).
- Sistemi a doppio flusso (Figura 2-12) realizzati grazie ad una doppia rete aeraulica collegata a due ventilatori distinti che realizzano mandata d'aria di rinnovo nelle stanze "nobili" e ripresa dell'aria dalle stanze "sporche"

Il paragrafo specifica poi che, nel caso ci sia un apparecchio di tipo C e/o un apparecchio di cottura con sorveglianza di fiamma, il locale di installazione non necessita di aperture di ventilazione. Come anche alcuni autori sottolineano (Raisa, et al., 2010) questo rappresenta un passo avanti rispetto alle tecniche di costruzione tradizionali che prevedono le classiche prese d'aria in cucina, (anche nel caso di VMC) visto che molto spesso queste ultime non sono oggetto di un utilizzo corretto da parte dell'utente che in inverno tende a otturarle per evitare l'ingresso di aria fredda. Così, se da un lato la norma consente, nei casi specificati, di eliminare la presa di aria esterna, dall'altro è necessario

provvedere ad intercettare il gas in assenza di ventilazione. La indicano la presenza di una elettrovalvola (9) sulla linea del gas (6) che dovrà essere collegata in qualche modo a un dispositivo (pressostato) che segnala la mancanza di flusso d'aria.

- 1 Entrata d'aria
- 2 Al pressostato a bordo del ventilatore
- 3 Al ventilatore
- 4 Estrazione
- 5 Soggiorno
- 6 Gas
- 7 Bagno
- 8 Transito: 100 cm²
- 9 Elettrovalvola sul gas

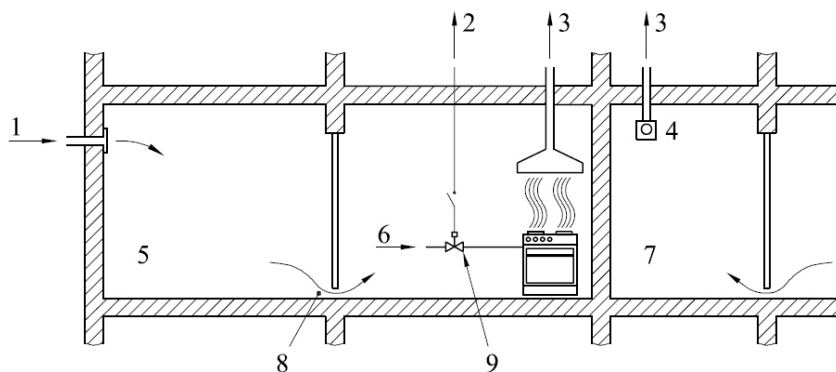


Figura 2-11 - Esempio di VMC a semplice flusso. Il sistema prevede un unico ventilatore (da UNI 7129-2:2008)

Legenda

- 1 Dal ventilatore
- 2 Al pressostato a bordo del ventilatore
- 3 Al ventilatore
- 4 Estrazione
- 5 Soggiorno
- 6 Gas
- 7 Bagno
- 8 Transito: 100 cm²
- 9 Elettrovalvola sul gas

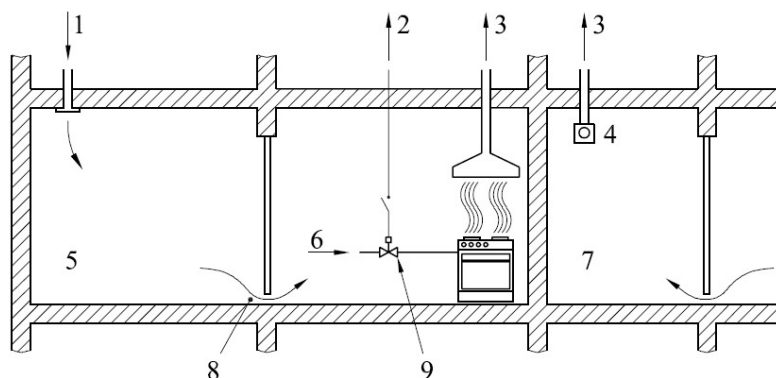


Figura 2-12 - Esempio di VMC a doppio flusso. Il sistema prevede due ventilatori distinti. (da UNI 7129-2:2008)

Ventilazione indiretta

E' consentito l'utilizzo della ventilazione indiretta, purché il locale di installazione dell'apparecchio di utilizzazione e il locale per l'aria comburente siano entrambi privi di apparecchi di tipo A (Figura 2-13).

Quando questo tipo di ventilazione è ammesso, il locale per l'aria comburente:

- a) Deve essere messo in comunicazione con il locale di installazione tramite apertura permanente, realizzata mediante maggiorazione della fessura tra porta e pavimento o con griglie su porte o pareti divisorie comuni a detti locali. La sezione utile netta deve essere almeno pari alla sezione utile netta dell'apertura di ventilazione presente nel locale per l'aria comburente
- b) Non deve essere un locale ad uso bagno, o classificato con pericolo di incendio (come autorimesse, box), una camera da letto e non deve costituire parte comune dell'immobile
- c) Non deve essere messo in depressione rispetto al locale da ventilare

Legenda

- 1 Locale adiacente
- 2 Locale da ventilare
- 3 Maggiorazione della fessura tra porta e pavimento

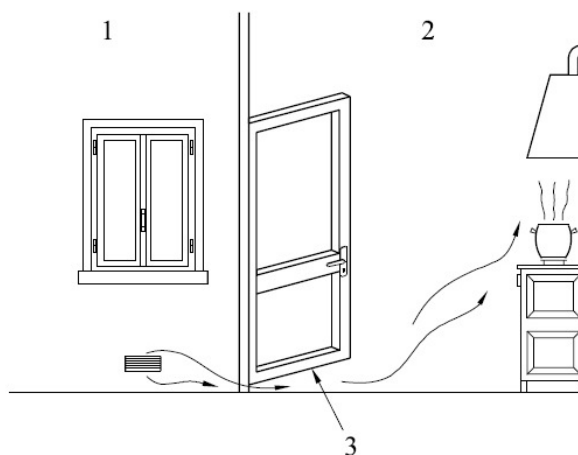


Figura 2-13 - Esempio di ventilazione indiretta (da UNI 7129-2:2008)

2.3.5.3 Calcolo della sezione netta totale delle aperture di ventilazione

La sezione netta totale S_t (espressa in cm^2), delle aperture destinate alla ventilazione del locale di installazione deve essere almeno pari a:

$$S_t = K \times Q \geq 100 cm^2$$

dove:

K = coefficiente di ventilazione pari a $6 cm^2 / kW$

Q = portata termica nominale massima complessiva degli apparecchi installati nel medesimo locale espressa in kW

Da questo calcolo sono esclusi gli apparecchi di tipo C. E' consentito suddividere la sezione totale calcolata secondo la formula sopra riportata su una o più aperture purché la sezione minima di ciascuna apertura non sia minore di $100 cm^2$. Se nel locale di installazione di apparecchi di tipo B o in locali direttamente comunicanti sono presenti estrattori elettro-meccanici, per esempio le cappe aspiranti di tipo elettrico e/o elettroventilatori, ecc. collegati con l'esterno, la sezione di ventilazione utile totale netta calcolata con la formula sopra deve essere maggiorata. Questa maggiorazione deve essere realizzata in funzione della massima portata dell'estrattore in modo da garantire che la velocità v dell'aria all'ingresso dell'apertura sia minore di 1 m/s.

In Tabella 2-32 sono riportate le maggiorazioni necessarie per soddisfare le normali esigenze di ventilazione in presenza di estrattori dimensionati considerando una portata d'aria pari a $1,72 m^3/h$ per kW installato.

Portata massima m^3/h	Velocità entrata aria m/s	Maggiorazione cm^2
fino a 50	≈ 1	140
da 50 fino 100	≈ 1	280
da 100 fino 150	≈ 1	420

Tabella 2-32 - Maggiorazioni dell'apertura di ventilazione in relazione alla portata massima degli estrattori dell'aria (da UNI 7129-2:2008)

L'appendice A della normativa riporta inoltre una metodologia di calcolo per determinare la sezione totale netta delle aperture di aerazione e ventilazione utilizzabile in tutti i casi,

comprese le situazioni in cui sono preesistenti privi del dispositivo di sorveglianza di fiamma, e cappe e/o estrattori elettro-meccanici (elettroventilatori) di qualsiasi portata.

Il presente metodo non si applica in presenza di sistemi di aerazione e/o ventilazione meccanica controllata per i quali la superficie minima risulta essere quella calcolata nel procedimento prima esposto.

La sezione netta totale S_{t1} delle aperture destinate alla aerazione e alla ventilazione del locale di installazione deve essere almeno pari a:

$$S_{t1} = (12 \times Q_A) + (6 \times Q_B) + (12 \times Q_C) + (6 \times K \times Q_{CS}) \quad [cm^2]$$

dove:

Q_A = portata termica nominale massima complessiva espressa in kW, riferita agli apparecchi di tipo A installati nel locale

Q_B = portata termica nominale massima complessiva espressa in kW, riferita agli apparecchi di tipo B installati nel locale

Q_C = portata termica nominale massima complessiva espressa in kW, riferita agli apparecchi di cottura preesistenti, senza dispositivo di sorveglianza di fiamma, installati nel locale

Q_{CS} = portata termica nominale massima complessiva espressa in kW, riferita agli apparecchi di cottura con dispositivo di sorveglianza di fiamma, installati nel locale

Il parametro K, in relazione alla modalità di evacuazione dei prodotti della combustione degli apparecchi di cottura con dispositivo di sorveglianza di fiamma installati nel locale e in relazione ad ulteriori condizioni di installazione aggiuntive, può assumere i valori numerici qui di seguito riportati:

- a) $K = 0$ se l'evacuazione dei prodotti della combustione degli apparecchi di cottura con dispositivo di sorveglianza di fiamma installati nel locale è assicurata mediante cappa a tiraggio naturale, cappa aspirante elettrica o elettroventilatore e se, contemporaneamente, risultano soddisfatti i seguenti ulteriori requisiti:
 - Nessun apparecchio di tipo B e/o di tipo A e/o nessun apparecchio di cottura senza dispositivo di sorveglianza di fiamma installato nel locale

- Portata termica nominale massima complessiva degli apparecchi di cottura con dispositivo di sorveglianza di fiamma installati non maggiore di 11,7 kW
 - Volumetria del locale di installazione non minore di 20m³. Ai fini del calcolo della volumetria del locale di installazione si considera anche il locale adiacente e comunicante senza interposizione di porte, purché detto locale non sia adibito a camera da letto, non sia sede di installazione di apparecchi a gas (di tipo A e/o B) e non sia un locale classificato con pericolo di incendio
 - Presenza nel locale di installazione di porte, finestre e/o portafinestra, apribili, e installate su pareti perimetrali rivolte verso l'esterno
- b) $K = 1$ se l'evacuazione dei prodotti della combustione degli apparecchi di cottura con dispositivo di sorveglianza di fiamma installati nel locale è assicurata mediante cappa a tiraggio naturale o aspirante elettrica oppure mediante elettroventilatore.
- c) $K = 2$ se l'evacuazione dei prodotti della combustione degli apparecchi di cottura con dispositivo di sorveglianza di fiamma è assicurata mediante apertura permanente di aerazione e se, contemporaneamente, risultano soddisfatti i seguenti ulteriori requisiti:
- portata termica nominale massima complessiva degli apparecchi di cottura con dispositivo di sorveglianza di fiamma installati nel locale non maggiore di 11,7 kW;
 - portata termica nominale massima complessiva riferita agli apparecchi di tipo A e agli apparecchi di cottura con dispositivo di sorveglianza di fiamma installati nel locale non maggiore di 15 kW.

In sostituzione della relazione sopra citata, se nel locale sono installati apparecchi di tipo B e se nel locale medesimo, o in locale con esso comunicante, è collocato un elettroventilatore o una cappa aspirante elettrica con portata oraria di ricambio di aria Q_E espressa in m³/h, si deve utilizzare la relazione seguente:

$$S_{T2} = 6 \times Q_B \left[1 + 0,5 \frac{Q_E}{Q_B} \right]^{0,74} \quad [cm^2]$$

purché risulti comunque soddisfatta la seguente condizione

$$S_{T2} \geq S_{T1}$$

In Tabella 2-33 sono riportati i valori di S_{T2} in corrispondenza di prefissati valori di riferimento di portata termica Q_B (kW) e di portata oraria di ricambio di aria Q_E (m³/h).

Portata termica Q_B di un apparecchio di tipo B (kW)	Portata d'aria estrattore meccanico Q_E (m ³ /h)												
	50	100	150	200	250	300	400	500	600	700	800	900	1 000
16	193	274	347	416	480	542	659	768	873	973	1 070	1 164	1 255
18	206	289	364	434	501	564	684	797	904	1 008	1 107	1 204	1 298
20	219	303	380	452	520	585	708	823	934	1 040	1 142	1 241	1 337
22	231	317	396	469	538	605	730	849	962	1 070	1 175	1 276	1 375
24	244	331	411	485	556	624	752	873	988	1 099	1 206	1 309	1 410
26	257	345	426	502	573	642	773	896	1 014	1 126	1 235	1 341	1 444
28	269	359	440	517	590	660	793	918	1 038	1 153	1 264	1 371	1 476
30	282	372	455	533	607	678	813	940	1 061	1 178	1 291	1 401	1 507
32	294	385	469	548	623	695	832	961	1 084	1 203	1 317	1 429	1 537
34	307	398	483	563	639	712	850	981	1 006	1 227	1 343	1 256	1 566

Tabella 2-33 - Valori di S_{T2} (cm²) in corrispondenza di Q_B (kW) e di Q_E (m³/h) (da UNI 7129-2:2008)

Valore minimo della sezione netta totale

La verifica del valore minimo della sezione netta totale non deve essere eseguita quando il parametro K assume il valore zero.

La sezione netta totale deve essere non minore di 200 cm² nel caso in cui il locale è sede di installazione di un apparecchio di tipo A oppure di apparecchi di cottura senza sorveglianza di fiamma oppure di apparecchi di cottura con dispositivo di sorveglianza di fiamma, la cui evacuazione dei prodotti della combustione è assicurata mediante apertura permanente di aerazione. In tutti i restanti casi, la sezione netta totale deve essere non minore di 100 cm².

2.3.6 Normativa di prodotto

La direttiva 89/106/CEE sui prodotti da costruzione definisce i requisiti essenziali per garantire l'affidabilità del prodotto e definisce la marcatura CE per sottolinearne la conformità. Tra questi prodotti ricadono i componenti dei sistemi di ventilazione, trattati dalle norme UNI EN 13141-x e UNI EN 13142:2013.

2.3.6.1 UNI EN 13141-x

Questa norma, che recepisce la direttiva europea, è suddivisa in dieci parti, articolate come in Tabella 2-34:

UNI EN 13141-1:2004	Ventilazione degli edifici - Verifica delle prestazioni di componenti/prodotti per la ventilazione degli alloggi - Dispositivi di diffusione dell'aria montati all'esterno e all'interno
UNI EN 13141-2:2010	Ventilazione degli edifici - Verifica delle prestazioni di componenti/prodotti per la ventilazione degli alloggi - Bocchette per l'estrazione e l'immissione dell'aria
UNI EN 13141-3:2004	Ventilazione degli edifici - Verifica delle prestazioni di componenti/prodotti per la ventilazione degli alloggi - Cappe per uso domestico
UNI EN 13141-4:2011	Ventilazione degli edifici - Verifica delle prestazioni di componenti/prodotti per la ventilazione degli alloggi - Ventilatori utilizzati negli impianti di ventilazione degli alloggi
UNI EN 13141-5:2005	Ventilazione degli edifici - Verifica delle prestazioni di componenti/prodotti per la ventilazione degli alloggi - Aspiratori statici e dispositivi di uscita in copertura
UNI EN 13141-6:2004	Ventilazione degli edifici - Verifica delle prestazioni di componenti/prodotti per la ventilazione degli alloggi - Kit per impianti di estrazione per abitazioni unifamiliari
UNI EN 13141-7:2011	Ventilazione degli edifici - Verifica delle prestazioni di componenti/prodotti per la ventilazione degli alloggi - 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
UNI EN 13141-8:2008	Ventilazione degli edifici - Verifica delle prestazioni di componenti/prodotti per la ventilazione degli alloggi - Verifica delle prestazioni di unità di ventilazione meccanica di immissione ed estrazione (compreso il recupero di calore) di impianti di ventilazione meccanica destinati ad ambienti singoli
UNI EN 13141-9:2008	Ventilazione degli edifici - Verifica delle prestazioni di componenti/prodotti per la ventilazione degli alloggi - Dispositivi di immissione dell'aria igroregolabili montati all'esterno
UNI EN 13141-10:2008	Ventilazione degli edifici - Verifica delle prestazioni di componenti/prodotti per la ventilazione degli alloggi - Dispositivi di estrazione dell'aria igroregolabili

Tabella 2-34 - Articolazione della norma UNI EN 13141

2.3.6.2 UNI EN 13142:2013

Questa norma, intitolata “*Ventilazione per edifici. Componenti/prodotti per la ventilazione residenziale. Caratteristiche di prestazione richieste e facoltative*” introduce numerosi parametri relativi alle perdite d’aria esterne e interne, agli aspetti acustici ed energetici (efficienza di recupero, potenza specifica, ecc) e alla filtrazione; interessante è soprattutto la distinzione tra i sistemi SDHR (*Centralized Single Dwellings Units with Heat Recovery*, sistemi centralizzati per abitazioni unifamiliari con recupero di calore) e i sistemi SRHR (*Single Room Units with Heat Recovery*, unità per singolo ambiente con recupero di calore).

Fondamentale parametro è NTPF (“*Nominal temperature performance factor*”), fattore nominale di efficienza di temperatura alla portata volumetrica di riferimento, dato da:

$$NTPF = \frac{\eta_{\Theta, su} \times \rho \times c_p \times \Delta\theta}{SPI}$$

dove:

$\eta_{\Theta, su}$ = rapporto di temperatura in accordo alla UNI EN 13141-7:2011

ρ = densità dell’aria, pari a 1,2 kg/m³

c_p = calore specifico pari a 1007 J/kgK

$\Delta\theta$ = differenza di temperatura nominale, pari a 13 K (da UNI EN 13141-7:2011)

SPI = potenza elettrica specifica di ventilazione $\left[\frac{W}{m^3 / s} \right]$

Questo parametro è fondamentale soprattutto per confrontare i sistemi a recupero di calore con scambiatori e quelli con pompe di calore, a recupero termodinamico. Non è però del tutto esaustivo, come sottolineano altri autori (Raisa, et al., 2010) in quanto tende a premiare sistemi con assorbimenti elettrici bassi ma non tiene conto del rapporto tra l’energia recuperata e quella massima recuperabile dall’aria espulsa.

3 TECNICA E TECNOLOGIA DELLA VENTILAZIONE

3.1 Ventilazione

3.1.1 Definizioni

Lo standard americano ASHRAE 62-1:2010 definisce la ventilazione come “*il processo di immissione e/o estrazione d’aria da e/o verso un ambiente confinato con lo scopo di controllare i livelli di inquinanti, l’umidità o la temperatura*” mentre la UNI EN 12792 come “*Progetto di immissione ed estrazione di aria in e da un ambiente*”.

Obiettivo della ventilazione è quindi quello di immettere aria pulita in un ambiente ed estrarre quella inquinata nella maniera più efficiente possibile. Se l’aria immessa fosse perfettamente miscelata con quella nell’ambiente, la concentrazione dei contaminanti sarebbe la stessa in tutti i punti dello spazio: questo caso è molto raro, per cui si è introdotto il concetto di efficienza di ventilazione.

3.1.2 Efficienza di ventilazione

Questo parametro indica quanto velocemente un inquinante viene rimosso dall’ambiente, ed è definito dalla seguente relazione:

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

dove:

C_e = concentrazione dell’inquinante all’estrazione

C_i = concentrazione dell’inquinante nel punto considerato

C_s = concentrazione dell'inquinante all'immissione

In tal modo, l'efficienza di ventilazione dipende da molti fattori quali: il tipo di ventilazione, la temperatura dell'aria immessa e dell'aria ambiente, le portate d'aria, la posizione degli inquinanti, ecc. Nel caso di perfetta miscelazione ϵ_v è uguale a 1, se la qualità dell'aria nella zona dove si respira (*breathing zone*) è migliore di quella all'estrazione, allora $\epsilon_v > 1$ e la portata si può ridurre per ottenere la stessa qualità dell'aria; se invece la qualità dell'aria nella *breathing zone* è inferiore di quella all'estrazione risulta $\epsilon_v < 1$ e la portata deve essere aumentata. Secondo il rapporto CR 1752, la portata viene così modificata:

$$q = \frac{q_n}{\epsilon_v} \quad \text{con } q_n \text{ portata nominale d'aria}$$

Sempre da questo rapporto (Tabella 3-1) è possibile individuare il valore di ϵ_v per diverse configurazioni dei sistemi di ventilazione (a miscelazione, a dislocazione).

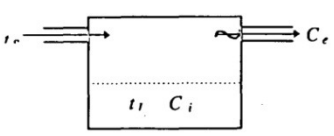
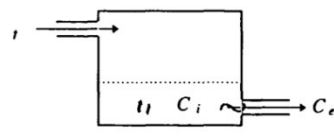
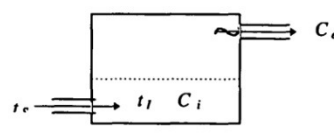
Mixing ventilation		Mixing ventilation		Displacement ventilation	
					
Temperature difference between supply air and air in breathing zone $t_s - t_i$ °C	Ventilation effectiveness	Temperature difference between supply air and air in breathing zone $t_s - t_i$ °C	Ventilation effectiveness	Temperature difference between supply air and air in breathing zone $t_s - t_i$ °C	Ventilation effectiveness
< 0	0,9—1,0	< -5	0,9	< 0	1,2—1,4
0—2	0,9	-5—0	0,9—1,0	0—2	0,7—0,9
2—5	0,8	> 0	1,0	> 2	0,2—0,7
> 5	0,4—0,7				

Tabella 3-1 - Valori di ϵ_v per diversi sistemi di ventilazione (tratto da CR 1752)

3.1.3 Tasso di ricambio d'aria

La quantità di aria da immettere o estrarre da un ambiente può essere espressa in diversi modi: in termini di portata d'aria per persona (l/s pers), per unità di superficie in pianta (l/s m²) oppure in termini di volumi ambiente d'aria per unità di tempo (h⁻¹), definendo il cosiddetto tasso di ricambio d'aria.

Questo indice (n) è il rapporto tra la portata d'aria entrante in uno spazio e il volume dello spazio stesso, definito quindi come:

$$n = \frac{q}{V}$$

dove:

n = tasso di ricambio orario [h⁻¹]

q = portata d'aria [m³ / h]

V = volume interno dell'ambiente [m³]

E' importante notare come il parametro di progetto sia la portata d'aria, che regola la qualità dell'aria, mentre l'indice n , che deriva dalla portata, ha puramente una funzione comparativa.

3.2 Tecniche di ventilazione

L'ingresso e l'uscita di aria negli ambienti può avvenire attraverso diverse tecniche: aerazione, infiltrazione, ventilazione naturale, ventilazione meccanica e ventilazione ibrida. Si vuole qui sottolineare un aspetto importante: l'apertura manuale delle finestre affidata all'utenza e l'infiltrazione attraverso involucro e serramenti non possono essere considerati "sistemi" di ventilazione (anche se sfruttano i principi della ventilazione naturale) in quanto, come definito dalla norma UNI EN 12792, la ventilazione richiede un progetto vero e proprio come non avviene in questi due casi. Per questo motivo sono trattati a parte rispetto alle altre tecniche.

3.2.1 Aerazione

Per aerazione si intende l'apertura manuale delle finestre da parte degli utenti allo scopo di rinnovare l'aria ambiente attraverso l'immissione di aria esterna. Tale tecnica non è vantaggiosa per diversi motivi: le dispersioni di energia sono notevoli, l'ingresso di aria esterna non filtrata porta con sé gli inquinanti dell'ambiente esterno e oltretutto non è possibile controllare con precisione le portate di aria.

In generale se si considera un edificio sottoposto all'azione del vento è possibile individuare una zona di pressione sul lato sopravvento e una di depressione in quello sottovento (Figura 3-1).

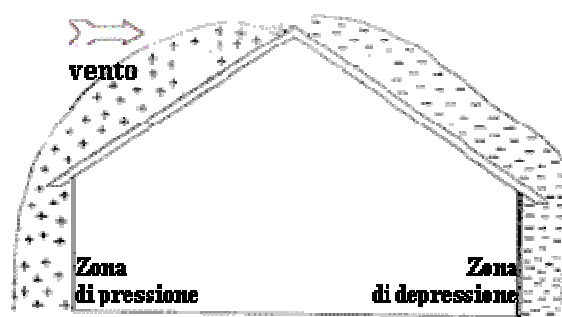


Figura 3-1 - Pressione e depressione sulle facciate di un edificio sottoposto all'azione del vento

Si possono quindi definire le due possibilità che si possono presentare (Figura 3-2): ventilazione frontale (*single-side ventilation*) e ventilazione passante (*cross-side ventilation*).

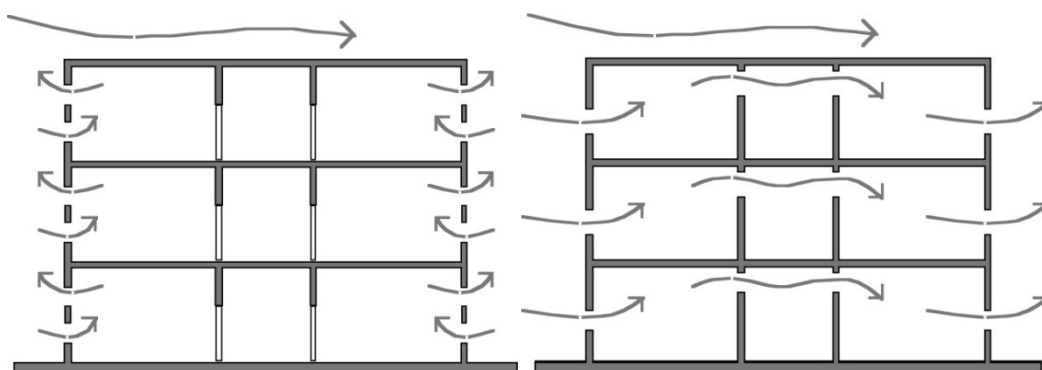


Figura 3-2 - Schemi di funzionamento della ventilazione frontale e passante (Emmerich, et al., 2001)

3.2.1.1 Ventilazione frontale

Con questo metodo il rinnovo dell'aria di un ambiente avviene attraverso una apertura che permette contemporaneamente l'ingresso e l'uscita di una certa portata d'aria, generata dall'effetto del vento e dalle forze ascensionali prodotte dall'aria calda. Infatti quando la temperatura interna è più alta di quella esterna l'ingresso di aria fredda dal basso determina l'uscita di quella calda dall'alto (Figura 3-3).

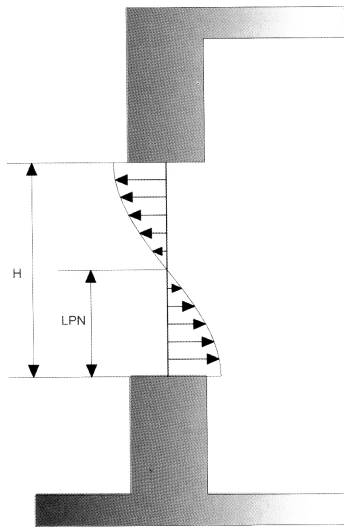


Figura 3-3 - Rappresentazione della velocità dell'aria in corrispondenza di un'apertura (De Santoli, et al., 2011)

Un metodo di calcolo è descritto nella norma UNI EN 15242:2008 in cui, al punto 6.5, è indicato come computare il flusso d'aria dovuto all'apertura delle finestre. Per l'apertura dei serramenti su un unico lato il flusso d'aria si calcola come:

$$q_{v,airing} = 3,6 \times 500 A_{ow} V^{0,5}$$

dove:

$$q_{v,airing} = \text{portata d'aria} \left[m^3 / h \right]$$

$$A_{ow} = \text{area apribile della finestra} \left[m^2 \right]$$

Il parametro V è dato dalla seguente relazione:

$$V = C_t + C_w \times V_{met}^2 + C_{st} \times H_{window} \times |\theta_i - \theta_e|$$

dove:

$C_t = 0,01$ è un coefficiente che tiene conto della turbolenza del vento

$C_w = 0,001$ è un coefficiente che tiene conto della velocità del vento

$C_{st} = 0,0035$ è un coefficiente che prende in considerazione l'effetto del tiraggio

H_{window} = area libera di altezza della finestra [m]

V_{met} = velocità del vento meteorologica a 10m di altezza [m / s]

θ_i = temperatura dell'aria della stanza

θ_e = temperatura dell'aria esterna

Nella norma viene anche indicato un metodo per calcolare A_{ow} per finestre che non sono aperte totalmente. Tale metodo può risultare utile per lo studio di sistemi di ventilazione naturale basati su apertura parziale, manuale o automatica, di finestre specificamente concepite. A tal fine si calcola:

$$A_{ow} = C_k(\alpha) A_w$$

dove

A_{ow} = area apribile della finestra [m²]

A_w = superficie della finestra quando totalmente aperta [m²]

Per $C_k(\alpha)$ si può utilizzare la seguente espressione polinomiale:

$$C_k(\alpha) = 2,60 \cdot 10^{-7} \alpha^3 - 1,19 \cdot 10^{-4} \alpha^2 + 1,86 \cdot 10^{-2} \alpha$$

dove α è l'angolo di apertura della finestra.

L'andamento della funzione $C_k(\alpha)$ è visibile in Figura 3-4.

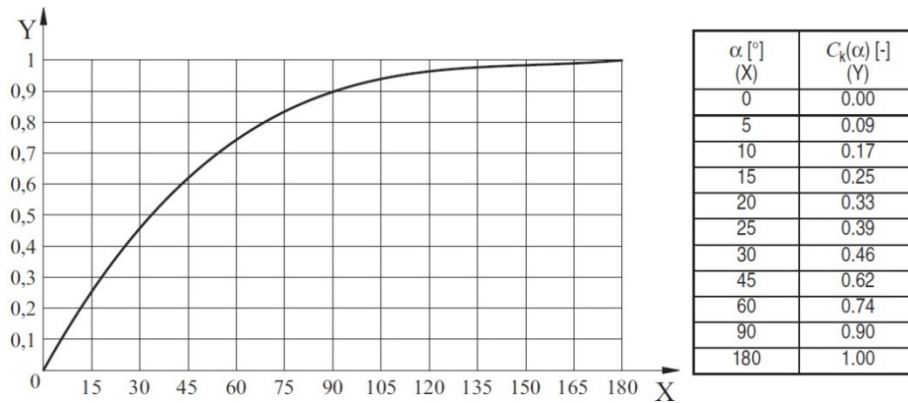


Figura 3-4 - Rapporto del flusso attraverso una finestra oscillante e la finestra totalmente aperta; da UNI EN 15242

La stessa norma, al paragrafo 6.5.1.2 riporta un metodo semplificato. Quando la qualità dell'aria interna è relativa solo all'apertura delle finestre, si considera che il comportamento dell'utilizzatore tenda a portate d'aria maggiori rispetto a quelle richieste.

Il coefficiente C_{airing} considera questo aspetto:

$$q_{v-airing} = C_{airing} \cdot \max(q_{v-sup-req}, q_{v-exh-req})$$

dove:

$$q_{v-sup-req} = \text{portata d'aria esterna richiesta } [m^3 / h]$$

$$q_{v-exh-req} = \text{portata d'estrazione richiesta } [m^3 / h]$$

C_{airing} = coefficiente che considera l'efficienza dell'occupante riguardo all'apertura delle finestre, assumendo che le portate d'aria minime di rinnovo siano soddisfatte, ma anche riguardo al tipo di occupazione della stanza

Il coefficiente C_{airing} deve essere definito a livello nazionale soprattutto se l'aerazione è considerata come unica possibilità per il rinnovo dell'aria. A livello italiano non è stato definito alcun valore per questo coefficiente.

Oltre a questa norma è possibile utilizzare il metodo previsto dal British Standard BS 5925:1991 per la ventilazione frontale (Figura 3-5).

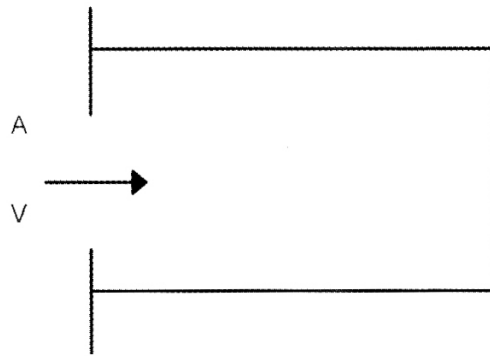


Figura 3-5 - Ventilazione frontale dovuta all'azione del vento con apertura singola (tratta da BS 5925:1991)

La portata d'aria per ventilazione frontale con apertura singola vale:

$$Q = 0,025 \cdot A \cdot v$$

dove:

A = superficie dell'apertura [m^2]

v = velocità del vento [m/s]

3.2.1.2 Ventilazione passante

Si è visto come l'azione del vento generi dei gradienti di pressione sulle facciate degli edifici, positivi sopravvento e negativi sottovento. Nel caso di apertura dei serramenti sui due prospetti si genera un moto dell'aria passante attraverso gli ambienti (Figura 3-6).

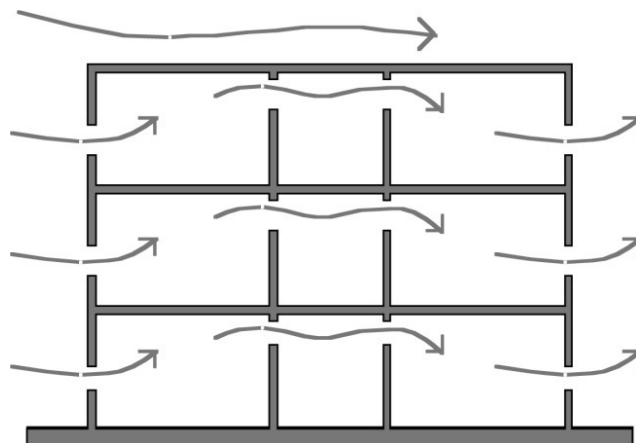


Figura 3-6 - Ventilazione passante (Emmerich, et al., 2001)

Il metodo di calcolo che si espone proviene dalle indicazioni del British Standard BS 5925:1991; tale metodo ha il vantaggio di poter essere eseguito manualmente ma le ipotesi semplificative, come ad esempio l'assenza di partizioni interne (adatta quindi a grandi *open space*) e la stima approssimata dei gradienti termici interni all'edificio, rende i risultati meno accurati rispetto a quelli ottenibili con modelli più complessi.

Per il calcolo della ventilazione dovuta al contributo del vento (Figura 3-7) è possibile utilizzare la seguente formula:

$$Q = C_d A_w u \sqrt{\Delta C_p}$$

dove:

u = velocità del vento [m / s]

ΔC_p = differenza dei coefficienti di pressione (si veda paragrafo 3.4.3.1)

$$\frac{1}{A_w^2} = \frac{1}{(A_1 + A_2)^2} + \frac{1}{(A_3 + A_4)^2}$$

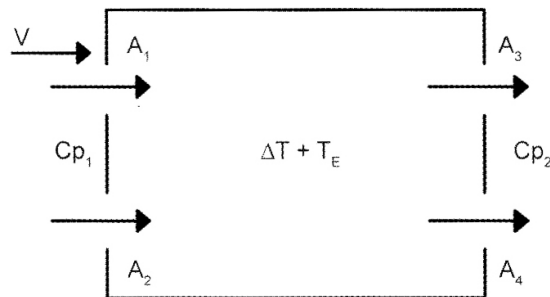


Figura 3-7 - Ventilazione passante dovuta all'azione del vento con doppia apertura su due lati (tratta da BS 5925:1991)

3.2.2 Infiltrazione

3.2.2.1 Infiltrazione attraverso l'involucro

L'infiltrazione è un flusso di aria esterna che penetra in un ambiente attraverso aperture e fessure non intenzionali come ad esempio i punti di giunzione tra finestre e muri, tra pavimento/tetto e pareti; si contrappone all'esfiltrazione che è una fuga di aria verso l'esterno attraverso gli stessi punti critici dell'edificio, ai quali va prestata molta attenzione in fase di costruzione (Figura 3-8).

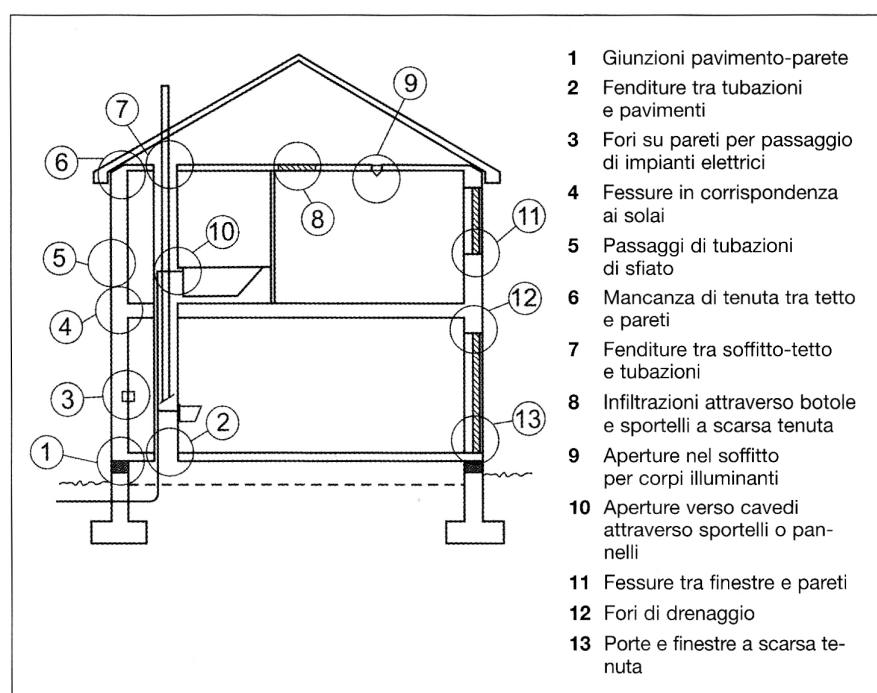


Figura 3-8 - Infiltrazioni attraverso l'involucro edilizio (Raisa, et al., 2010)

Si definisce permeabilità (di un edificio) la portata d'aria di infiltrazione attraverso l'involucro edilizio per unità di superficie (dell'involucro), in corrispondenza alla differenza di pressione di riferimento della prova, pari solitamente a 50 Pa. Questa definizione, tratta dalla norma UNI EN 13829:2002 indica una dei possibili indici per descrivere la tenuta all'aria di un edificio, che risultano essere quindi:

- la portata d'aria di infiltrazione prodotta da una differenza di pressione indotta (50 Pa – UNI EN 13829)
- il tasso di ricambio d'aria corrispondente a una differenza di pressione pari a 50 Pa (n_{50})

- l'area di infiltrazione effettiva e equivalente

In maniera empirica questi parametri possono essere ricavati attraverso l'utilizzo della tecnica dei gas traccianti, raramente utilizzata in quanto costosa e richiede personale altamente specializzato, oppure attraverso un metodo chiamato *blower door test*.

Senza entrare nel dettaglio della procedura (la letteratura sull'argomento è molto vasta) si definisce a grandi linee lo svolgimento del test, che permette di valutare il tasso di infiltrazione attraverso la permeabilità dell'involucro.

Un ventilatore assiale svolge il compito di imporre una differenza prefissata di pressione, di solito 50 Pa, raggiunta con diversi step, tra l'ambiente esterno e interno immettendo o estraendo una certa portata d'aria: per fare ciò il ventilatore deve essere inserito a tenuta nel vano di una porta o finestra (Figura 3-9).



Figura 3-9 - Apparecchiatura principale del test: è visibile il ventilatore inserito nel vano di una porta

La prova va eseguita sia in pressione che in depressione e per una sua corretta esecuzione tutte le porte interne devono rimanere aperte mentre quelle esterne e le finestre devono essere chiuse.

Numerosi sono i vantaggi per un edificio con un'alta tenuta all'aria, come la riduzione dei consumi energetici, l'aumento dell'isolamento acustico, la scomparsa di correnti d'aria e non da ultimo la riduzione della concentrazione di radon quando l'edificio è ben impermeabilizzato a terra.

Per quanto riguarda le aperture, ognuna di esse può essere descritta dalla seguente relazione:

$$Q = c(\Delta p)^n$$

dove:

Q = portata d'aria attraverso l'apertura $[m^3 / s]$

c = coefficiente generico di deflusso $[m^3 / (s \cdot Pa^n)]$

n = esponente correlato alla pressione

I valori di c e n possono essere ricavati attraverso la prova del *blower door test*, il quale fornisce anche il valore di Q_{50} , cioè la portata che il ventilatore deve immettere o estrarre dall'edificio per mantenere una differenza di pressione pari a 50 Pa. Il tasso di ricambio n_{50} si ottiene dividendo la portata d'aria Q_{50} per il volume dell'edificio.

Un altro indice è la cosiddetta “Area di infiltrazione” che raccoglie in sé tutte le fessure e le piccole aperture presenti nell'involucro; essa è definita dalla seguente equazione

$$A_L = 10000 \cdot Q_r \cdot \frac{\sqrt{\rho / 2\Delta p_r}}{C_D}$$

dove:

A_L = area di infiltrazione $[cm^2]$

Q_r = portata d'aria a Δp_r da prove di pressurizzazione $[m^3 / s]$

ρ = densità dell'aria $[kg / m^3]$

Δp_r = differenza di pressione di riferimento interno/esterno $[Pa]$

C_D = coefficiente specifico di deflusso

Dalla definizione di base vista sopra sono state definite due aree di infiltrazione differenti:

- Area di infiltrazione effettiva (*Effective Leakage Area, ELA*) considerando $C_D = 1$ e $\Delta p_r = 4$ Pa
- Area di infiltrazione equivalente (*Equivalent Leakage Area, EqLA*) con $C_D = 0,611$ e $\Delta p_r = 10$ Pa

Dal valore di n_{50} è possibile risalire al valore del tasso di ricambio orario in maniera sperimentale attraverso la seguente relazione :

$$n = \frac{n_{50}}{C_1}$$

in cui C_1 è solitamente posto pari a 20 (Raisa, et al., 2010) ma si tratta di un coefficiente molto variabile in funzione delle condizioni di vento, di schermatura e di dimensioni dell'edificio.

A partire sempre dal valore di n_{50} , la norma UNI EN 12831:2006 indica un metodo per il calcolo della portata di infiltrazione, finalizzata al calcolo della potenza termica di progetto, presentata al paragrafo 2.3.4.1.

3.2.2.2 Infiltrazione attraverso i serramenti

Il contributo degli infissi alla portata di infiltrazione d'aria negli edifici non è irrilevante: è certo che le infiltrazioni attraverso i serramenti non sono sufficienti a garantire una ventilazione adeguata, soprattutto nelle nuove costruzioni in cui si utilizzano infissi ad elevato grado di tenuta.

La norma UNI EN 12207:2000 (*“Finestre e porte. Permeabilità all'aria - Classificazione”*) definisce la classificazione degli infissi basata sul confronto tra la permeabilità all'aria del campione sottoposto a prova riferito all'intera area e la permeabilità all'aria riferita alla lunghezza dei lati apribili; vengono definite 4 classi in ordine decrescente di permeabilità (Tabella 3-2 e Tabella 3-3).

Classe	Permeabilità all'aria di riferimento a 100 Pa m ³ /hm ²	Pressione massima di prova Pa
0	Non sottoposto a prova	
1	50	150
2	27	300
3	9	600
4	3	600

Tabella 3-2 - Permeabilità all'aria di riferimento a 100 Pa e alle pressioni massime di prova, in rapporto alle superfici totali (da UNI EN 12207:2000)

Classe	Permeabilità all'aria di riferimento a 100 Pa m ³ /hm	Pressione massima di prova Pa
0	Non sottoposto a prova	
1	12,50	150
2	6,75	300
3	2,25	600
4	0,75	600

Tabella 3-3 - Permeabilità all'aria di riferimento a 100 Pa e alle pressioni massime di prova, in rapporto alla lunghezza dei lati apribili (da UNI EN 12207:2000)

Il grafico di Figura 3-10 permette di valutare, a determinate pressioni agenti sull'infisso, la portata d'aria infiltrata, per unità di superficie totale o per unità di lunghezza di lati apribili.

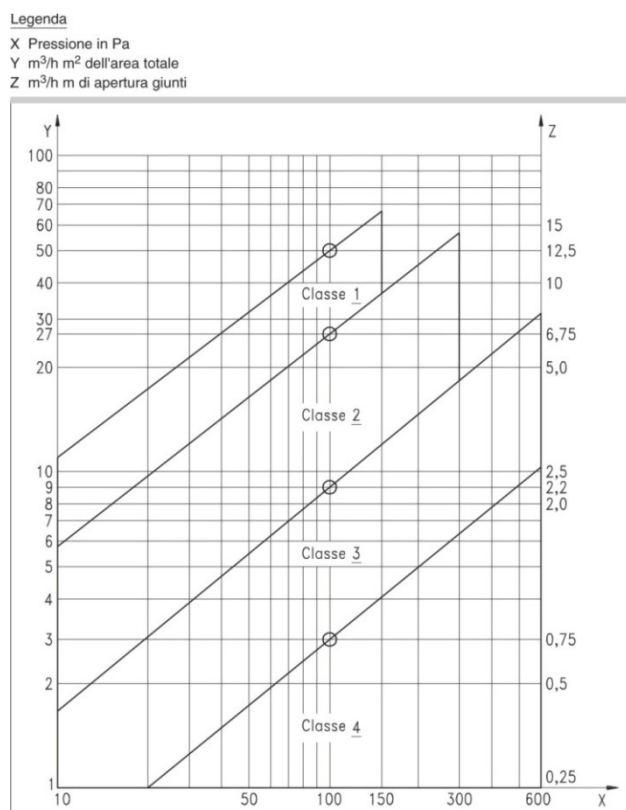


Figura 3-10 - Classificazione e portate d'aria di infiltrazione (da UNI EN 12207:2000)

3.2.3 Ventilazione naturale

La ventilazione naturale è ottenuta grazie all'azione del vento e al gradiente termico tra interno ed esterno che provocano l'ingresso di aria esterna negli ambienti interni, grazie ad aperture specificatamente previste.

3.2.3.1 Effetto del vento

Il gradiente anemologico è generato dall'incidenza del vento sulle superfici dell'edificio. Si è visto ad inizio capitolo che, per un edificio sottoposto all'azione del vento, si assiste ad un incremento di pressione sul lato sopravvento e contemporaneamente ad una diminuzione di pressione sul lato sottovento. Questa differenza di pressione tra interno ed esterno dell'edificio è tale da generare un moto di aria dalle zone sopravvento a quelle sottovento e può essere calcolata attraverso la seguente equazione:

$$\Delta p_v = 0.5 \cdot C_p \cdot \rho \cdot v^2$$

dove:

Δp_v = differenza di pressione tra interno ed esterno indotta dal vento [Pa]

C_p = coefficiente di pressione

ρ = densità dell'aria [kg / m³]

v = velocità del vento valutata alla quota di gronda dell'edificio [m / s]

Come è noto, la velocità del vento è non uniforme al variare dell'altezza, ma presenta un andamento parabolico, che si annulla in corrispondenza del terreno a causa del fenomeno di attrito dovuto alla rugosità dello stesso. Solitamente tra i dati meteorologici è possibile riscontrare la velocità dell'aria a 10 m di altezza che viene opportunamente corretta in relazione all'altezza dell'edificio, alla topografia, alla rugosità del terreno (De Santoli, et al., 2011 p. 39).

Il coefficiente C_p descrive la distribuzione della pressione indotta dal vento in corrispondenza delle superfici dell'edificio. In Tabella 3-4 sono riportati alcuni valori di

questo parametro valutati per 16 diverse direzioni del vento rispetto alla normale alla superficie incidente: 0°, 22.5°, 45°, 67.5°, 90°, 112.5°, 135°, 157.5°, 180°, 202.5°, 225°, 247.5°, 270°, 292.5°, 315°, 337.5° per edifici alti fino a tre piani.

N.	Superficie	R	Esposizione	C _p
1	Muro	1:1	E	0.7, 0.525, 0.35, -0.075, -0.5, -0.45, -0.4, -0.3, -0.2, -0.3, -4, -0.45, -0.5, -0.075, 0.35, 0.525
2	Tetto, p. > 10°	1:1	E	-0.8, -0.75, -0.7, -0.65, -0.6, -0.55, -0.5, -0.45, -0.4, -0.45, -0.5, -0.55, -0.6, -0.65, -0.7, -0.75
3	Tetto, p. > 10-30°	1:1	E	-0.4, -0.45, -0.5, -0.55, -0.6, -0.55, -0.5, -0.45, -0.4, -0.45, -0.5, -0.55, -0.6, -0.55, -0.5, -0.45
4	Tetto, p. > 30°	1:1	E	-0.3, -0.35, -0.4, -0.5, -0.6, -0.5, -0.4, -0.45, -0.5, -0.45, -0.4, -0.5, -0.6, -0.5, 0.4, 0.35
5	Muro	1:1	SE	0.4, 0.25, 0.1, -0.1, -0.3, -0.325, -0.35, 0.275, -0.2, -0.275, -0.35, -0.325, -0.3, -0.1, 0.1, 0.25
6	Tetto, p. < 10°	1:1	SE	-0.6, -0.55, -0.5, -0.45, -4, -0.45, -0.5, -0.55, -0.6, -0.55, -0.6, -0.55, -0.5, -0.45, -0.4, -0.45, -0.5, -0.55
7	Tetto, p. 10-30°	1:1	SE	-0.35, -0.4, -0.45, -0.5, -0.55, -0.5, -0.45, -0.4, -0.35, -0.4, -0.45, -0.5, -0.55, -0.5, -0.45, -0.4
8	Tetto, p. > 30°	1:1	SE	-0.3, -0.4, -0.5, -0.55, -0.6, -0.55, -0.5, -0.5, -0.5, -0.5, -0.5, -0.55, -0.6, -0.55, -0.5, 0.4
9	Muro	1:1	S	0.2, 0.125, 0.05, 0.1, -0.25, -0.275, -0.3, -0.275, -0.25, -0.275, -0.3, -0.275, -0.25, -0.1, 0.05, 0.125
10	Tetto, p. < 10°	1:1	S	-0.5, -0.5, -0.5, -0.45, -0.4, -0.45, -0.5, -0.5, -0.5, -0.5, -0.5, -0.45, -0.4, -0.45, -0.5, -0.5
11	Tetto, p. 10-30°	1:1	S	-0.3, -0.35, -0.4, -0.45, -0.5, -0.45, -0.4, -0.35, -0.3, -0.35, -0.4, -0.45, -0.5, -0.45, -0.4, -0.35
12	Tetto, p. > 30°	1:1	S	0.25, -0.025, -0.3, -0.4, -0.5, -0.4, -0.3, -0.35, -0.4, -0.35, -0.3, -0.4, -0.5, -0.4, -0.3, -0.025
13	Muro lungo	2:1	E	0.5, 0.375, 0.25, -0.125, -0.5, -0.65, -0.8, -0.75, -0.7, -0.75, -0.8, -0.65, -0.5, -0.125, -0.25, -0.375
14	Muro corto	1:2	E	-0.9, -0.35, 0.2, 0.4, 0.6, 0.4, 0.2, -0.35, -0.9, -0.75, -0.6, -0.475, -0.35, -0.475, -0.6, -0.75
15	Tetto, p. < 10°	2:1	E	-0.7, -0.7, -0.7, -0.75, -0.8, -0.75, -0.7, -0.7, -0.7, -0.7, -0.7, -0.7, -0.75, -0.8, -0.75, -0.7, -0.7
16	Tetto, p. 10-30°	2:1	E	-0.7, -0.7, -0.7, -0.7, -0.7, -0.65, -0.6, -0.55, -0.5, -0.55, -0.6, -0.65, -0.7, -0.7, -0.7, -0.7
17	Tetto, p. > 30°	2:1	E	0.25, 0.125, 0, -0.3, -0.6, -0.75, -0.9, -0.85, -0.8, -0.85, -0.9, -0.75, -0.6, -0.3, 0, 0, 0.125
18	Muro lungo	2:1	SE	0.5, 0.375, 0.25, 0, -0.5, -0.65, -0.8, -0.75, -0.7, -0.75, -0.8, -0.65, -0.5, -0.125, 0.25, 0.375
19	Muro corto	1:2	SE	-0.9, -0.35, 0.2, 0.4, 0.6, 0.4, 0.2, -0.35, -0.9, -0.75, -0.6, -0.475, -0.35, -0.475, -0.6, -0.75
20	Tetto, p. < 10°	2:1	E	-0.7, -0.7, -0.7, -0.75, -0.8, -0.75, -0.7, -0.7, -0.7, -0.7, -0.7, -0.7, -0.75, -0.8, -0.75, -0.7, -0.7
21	Tetto, p. 10-30°	2:1	E	-0.7, -0.7, -0.7, -0.7, -0.7, -0.65, -0.6, -0.55, -0.5, -0.55, -0.6, -0.65, -0.7, -0.7, -0.7, -0.7
22	Tetto, p. > 30°	2:1	E	0.25, 0.125, 0, -0.3, -0.6, -0.75, -0.9, -0.85, -0.8, -0.85, -0.9, -0.75, -0.6, -0.3, 0, 0, 0.125
23	Muro lungo	2:1	S	0.06, -0.03, -0.12, -0.16, -0.2, -0.29, -0.38, -0.34, -0.3, -0.34, -0.38, -0.29, -0.2, -0.16, -0.12, -0.03
24	Muro corto	1:2	S	-0.3, -0.075, 0.15, 0.165, 0.18, 0.165, 0.15, -0.075, -0.3, -0.075, 0.15, 0.165, 0.18, 0.165, 0.15, -0.075
25	Tetto, p. < 10°	2:1	S	-0.49, -0.475, -0.46, -0.435, -0.41, -0.435, -0.46, -0.475, -0.49, -0.475, -0.46, -0.435, -0.41, -0.435, -0.46, -0.475
26	Tetto, p. 10-30°	2:1	S	-0.49, -0.475, -0.46, -0.435, -0.41, -0.435, -0.46, -0.43, -0.4, -0.43, -0.46, -0.435, -0.41, -0.435, -0.46, -0.475
27	Tetto, p. > 30°	2:1	S	0.06, -0.045, -0.15, -0.19, -0.23, -0.42, -0.6, -0.51, -0.42, -0.51, -0.6, -0.42, -0.23, -0.19, -0.15, -0.045
28	Muro	1:1	E	0.9, 0.7, 0.5, 0.2, -0.1, -0.1, -0.2, -0.2, -0.2, -0.2, -0.1, -0.1, 0.2, 0.5, 0.7
29	Tetto piano	1:1	E	-0.1, -0.1, -0.1, -0.1, -0.1, -0.1, -0.1, -0.1, -0.1, -0.1, -0.1, -0.1, -0.1, -0.1, -0.1, -0.1

Tabella 3-4 - Valori del coefficiente di pressione C_p (R= rapporto lunghezza-larghezza, E = esposto, SE = semiesposto, S = schermato) (De Santoli, et al., 2011)

Per un calcolo analitico del coefficiente di pressione C_p è possibile ricorrere a un modello semplificato (Swami, et al., 1988) non applicabile a edifici a pianta non rettangolare e nei casi in cui gli effetti della turbolenza d'aria siano notevoli (elevata rugosità del terreno, edifici vicini che fungono da schermo) utilizzando la seguente equazione:

$$C_p = \ln \left[\begin{array}{l} 1.248 - 0.703 \cdot \sin\left(\frac{\varphi}{2}\right) - 1.175 \cdot \sin^2(\varphi) + 0.131 \cdot \sin^3(2\varphi G) + \\ + 0.769 \cdot \cos\left(\frac{\varphi}{2}\right) + 0.07 \cdot G^2 \cdot \sin^2\left(\frac{\varphi}{2}\right) + 0.717 \cdot \cos^2\left(\frac{\varphi}{2}\right) \end{array} \right] \cdot 0.6$$

dove:

φ = angolo di incidenza del vento rispetto alla facciata in cui è posta l'apertura

$G = \ln(l_1/l_2)$ con l_1 e l_2 pari alla lunghezza della facciata in cui è posta l'apertura e alla lunghezza della facciata ad essa ortogonale

3.2.3.2 Effetto camino

Tale effetto è dovuto al gradiente termico esistente tra l'ambiente esterno e quello interno: alla differenza di temperatura è collegata una differenza di densità dell'aria per la quale l'aria all'interno più calda fluisce verso l'alto, richiamando dall'esterno quella più fredda entrante dal basso (Figura 3-11): questo fenomeno è tanto più accentuato quanto gli ambienti sono alti.

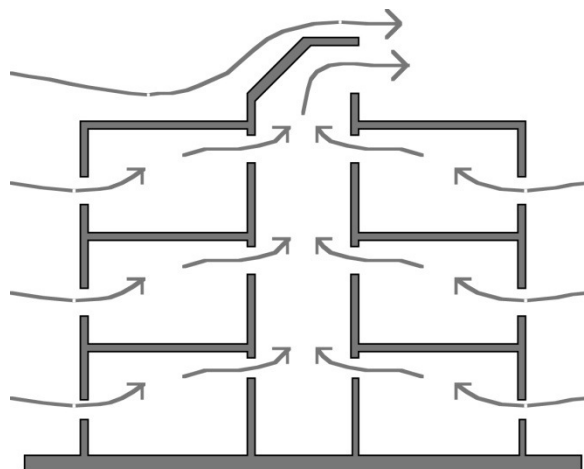


Figura 3-11 - Schema di funzionamento della ventilazione per effetto camino (Emmerich, et al., 2001)

Se si considera un ambiente di altezza notevole dotato di due aperture, una alla base e una in sommità, come in Figura 3-12, ipotizzando un andamento della pressione assoluta lineare e considerando che negli ambienti interni il riscaldamento dell'aria genera una forza ascensionale, è possibile tracciare qualitativamente l'andamento della pressione assoluta interna p_i e quella esterna p_e .

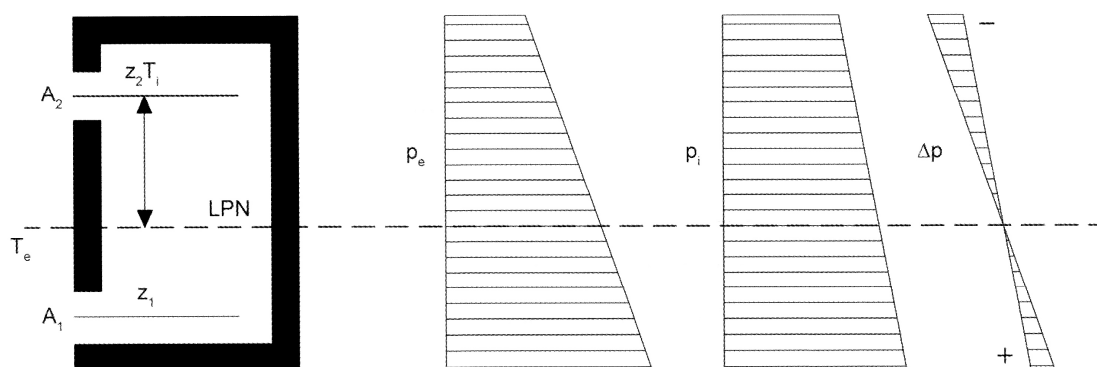


Figura 3-12 - Distribuzione della pressione esterna (p_e), della pressione interna (p_i), differenza di pressione tra interno ed esterno (Δp) e posizione del livello di pressione neutra (LPN) in un ambiente di altezza elevata (De Santoli, et al., 2011)

Le pressioni sono crescenti all'avvicinarsi del suolo per effetto della forza gravitazionale, in maniera minore all'interno rispetto all'esterno per la temperatura maggiore dell'ambiente. In Figura 3-12 è anche mostrato il profilo della differenza di pressione esistente tra interno ed esterno, dal quale risulta come nelle zone inferiori dell'ambiente la pressione esterna sia più elevata di quella interna ($\Delta p > 0$) con conseguente ingresso dell'aria; nella zona più alta invece, dove la pressione interna è maggiore di quella esterna ($\Delta p < 0$), avviene la fuoriuscita di aria.

L'altezza in corrispondenza della quale la differenza di pressione è nulla prende il nome di *livello di pressione neutra* (LPN): è fondamentale quindi per la realizzazione di aperture per la ventilazione conoscere la posizione di questo livello. Realizzando infatti una finestra al di sopra del LPN si verificherebbe una fuoriuscita di aria mentre aprendone una sotto il LPN si avrebbe solo ingresso di aria.

L'andamento della pressione assoluta $p(z)$ ad una quota generica z può essere descritto con la seguente espressione:

$$p(z) = p_0 - \rho \cdot g \cdot z$$

dove:

p_0 = pressione assoluta alla quota più bassa dell'ambiente [Pa]

g = accelerazione di gravità [m/s^2]

ρ = densità dell'aria alla temperatura interna T [kg/m^3]

Considerando l'aria un gas ideale, la densità può essere ricavata dalla seguente relazione:

$$\rho = \rho_0 \frac{T_0}{T}$$

dove:

ρ_0 = densità dell'aria di riferimento (1,29 kg/m³)

T = temperatura assoluta [K]

T_0 = temperatura di riferimento (273,15 K)

3.2.3.3 Strumenti di calcolo – modelli semiempirici

La valutazione su un intero edificio degli effetti combinati visti nei paragrafi precedenti è possibile solamente con modelli di simulazione complessi; in fase di progettazione è possibile avvalersi di semplici espressioni analitiche per il predimensionamento dei sistemi di ventilazione naturale. Uno dei modelli cosiddetti semiempirici più utilizzati è quello ricavato dalle indicazioni fornite dal British Standard BS 5925:1991 già analizzato in parte per valutare la portata d'aria attraverso una finestra. Tale metodo presenta le ipotesi di ventilazione frontale e passante esclusivamente dovuta all'azione del vento o all'effetto camino.

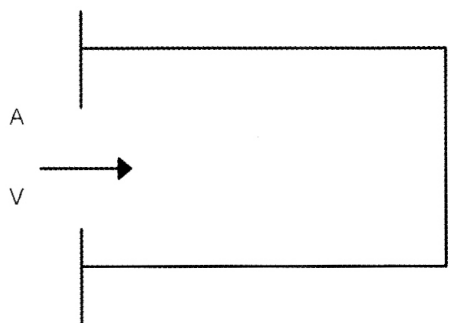


Figura 3-13 - Ventilazione frontale dovuta all'azione del vento con apertura singola

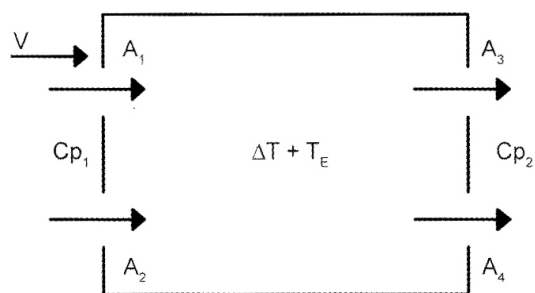


Figura 3-14 - Ventilazione passante dovuta all'azione del vento con doppia apertura su due lati

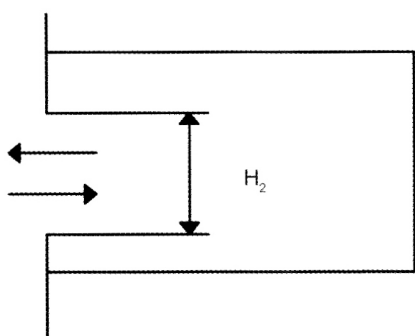


Figura 3-15 - Ventilazione frontale dovuta a differenza di temperatura con apertura singola

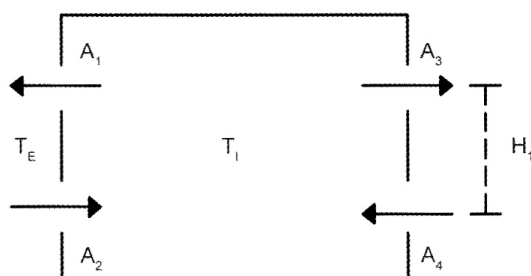


Figura 3-16 - Ventilazione passante dovuta a differenza di temperatura con doppia apertura su due lati

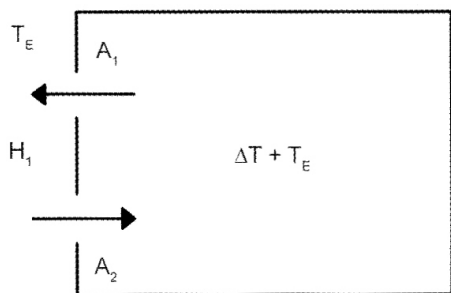


Figura 3-17 - Ventilazione frontale dovuta a differenza di temperatura con aperture doppie

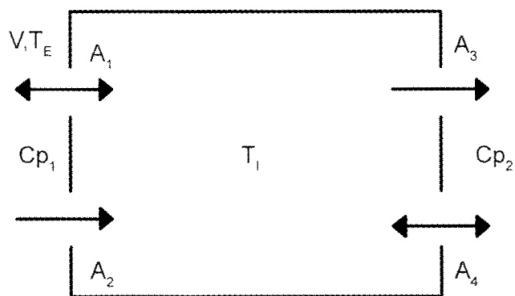


Figura 3-18 - Ventilazione passante dovuta all'azione del vento e differenza di temperatura con doppia apertura su due lati

Nel caso di Figura 3-13, ovvero ventilazione frontale con apertura singola, la portata di aria vale:

$$Q = 0.025 \cdot A \cdot v$$

dove:

A = superficie dell'apertura

v = velocità del vento

Per la Figura 3-14, ventilazione passante dovuta all'azione del vento, si ha:

$$Q_w = C_d A_w v \sqrt{\Delta C_p}$$

dove:

v = velocità del vento [m / s]

ΔC_p = differenza dei coefficienti di pressione

$$\frac{1}{A_w^2} = \frac{1}{(A_1 + A_2)^2} + \frac{1}{(A_3 + A_4)^2}$$

Nella Figura 3-15, ventilazione frontale con effetto camino e apertura singola, si ha:

$$Q = C_d \cdot \frac{A}{3} \cdot \sqrt{\frac{\Delta T \cdot g \cdot H_2}{T}}$$

$$\text{con } T = \frac{T_i + T_e}{2}$$

Nel caso di ventilazione passante per effetto camino con doppia apertura sui due lati (Figura 3-16) si ha:

$$Q_b = C_d \cdot A_b^2 \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta T \cdot g \cdot H_1}{T}}$$

dove:

$$A_b = \frac{1}{(A_1 + A_3)^2} + \frac{1}{(A_2 + A_4)^2}$$

Nel caso di ventilazione frontale per effetto camino con due aperture (Figura 3-17) si ha:

$$Q = C_d \cdot (A_1 + A_2) \cdot \left[\frac{(A_1 / A_2) \cdot \sqrt{2}}{[1 + (A_1 / A_2)] + [1 + (A_1 / A_2)^2]} \right] \cdot \frac{\Delta T \cdot g \cdot H_1}{T}$$

Nella Figura 3-18, ventilazione passante dovuta al vento e all'effetto camino con due aperture doppie, la portata di aria vale:

$$Q = Q_b \quad \text{se} \quad \frac{v}{\sqrt{\Delta T}} < 0.26 \sqrt{\frac{A_b}{A_w} \frac{H_1}{\Delta C_p}}$$

oppure

$$Q = Q_w \quad \text{se} \quad \frac{v}{\sqrt{\Delta T}} > 0.26 \sqrt{\frac{A_b}{A_w} \frac{H_1}{\Delta C_p}}$$

Nel caso in cui il moto dell'aria sia dovuto esclusivamente all'effetto camino, fissata la portata d'aria desiderata, è possibile correlare la dimensione delle superfici delle aperture di ingresso $A_{IN} = A_2 + A_4$ e di uscita dell'aria $A_{OUT} = A_1 + A_3$. Si ottiene quindi:

$$\frac{1}{(A_{IN})^2} + \frac{1}{(A_{OUT})^2} = \sqrt{2 \cdot C_d^2 \cdot \Delta T \cdot g \cdot H_1 / (Q_b^2 \cdot T)}$$

da cui, ricavato il termine di destra è possibile fissare un valore per l'area di ingresso o di uscita dell'aria per trovare rispettivamente quella di uscita o di ingresso.

3.2.3.4 Vantaggi e limiti

Negli ultimi anni si è assistito ad un crescente interesse per la ventilazione naturale, probabilmente in un'ottica di "sostenibilità" degli interventi e di risparmio energetico ma anche per il rapporto più diretto che si crea con l'ambiente esterno senza la frapposizione di elementi impiantistici. Come si è visto nei paragrafi precedenti la ventilazione naturale è originata dall'effetto del vento e dall'effetto camino: la dipendenza dalle condizioni climatiche esterne variabili rende difficile il calcolo delle portate di ventilazione ma

soprattutto in mancanza di una differenza di temperatura o in assenza di vento la portata d'aria di rinnovo tende ad annullarsi.

Sempre in riferimento alle condizioni esterne, nel caso di aree ad elevata densità abitativa, il sistema può non sortire gli effetti desiderati per l'eccessiva schermatura operata dagli edifici circostanti che limitano il movimento dell'aria. La velocità del vento non influisce molto sul funzionamento in quanto all'interno degli ambienti la velocità dell'aria deve essere comunque limitata.

La legge sconsiglia l'utilizzo della ventilazione naturale nei condomini per il rispetto dei limiti sull'isolamento acustico tra proprietà confinanti, limitandone l'applicazione agli edifici di proprietà unica.

Dal punto di vista costruttivo il sistema di ventilazione naturale è di facile posa in opera per gli edifici residenziali: sono sufficienti dispositivi o aperture per l'ingresso connessi all'esterno e griglie per l'estrazione dell'aria collegate a camini a tiraggio naturale (per una descrizione più dettagliata del sistema si veda il paragrafo 3.5.1).

3.2.4 Ventilazione meccanica

Con questa tecnica il ricambio di aria necessario degli ambienti è garantito attraverso una rete impiantistica cui fa capo uno o più ventilatori per la movimentazione meccanica dell'aria. Il principio fondamentale della ventilazione meccanica consiste nell'immissione di aria pulita di rinnovo negli ambienti della casa in cui l'uomo spende la maggior parte del proprio tempo (soggiorno e camere da letto) ed estrarre aria "viziata" dai locali cosiddetti "sporchi" (bagni e cucine) nei quali è notevole la produzione di vapore acqueo e CO₂.

Esistono sostanzialmente due tipologie di impianti che si differenziano per la dimensione delle reti aerauliche: sistemi a semplice estrazione e a flusso bilanciato (Figura 3-19). I primi sono caratterizzati dalla sola rete di estrazione con il ventilatore che, creando una depressione con l'aspirazione, richiama aria di rinnovo che viene fatta entrare attraverso appositi dispositivi installati solitamente negli infissi. I sistemi a flusso bilanciato, invece, necessitano anche di una rete di immissione, per cui risulta di più complessa realizzazione; hanno però il vantaggio di poter recuperare il calore dall'aria estratta, prima di essere re-immessa negli ambienti attraverso i recuperatori di calore, che

contribuiscono in maniera notevole al risparmio energetico. (per una descrizione più dettagliata dei sistemi si rimanda ai paragrafi 3.5.2 e 3.5.3)

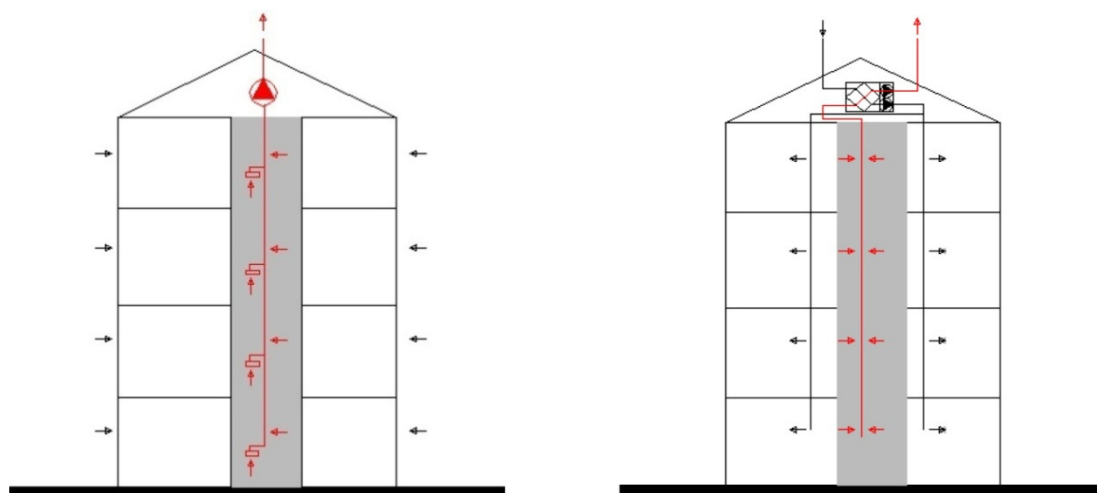


Figura 3-19 - Schema di ventilazione meccanica a semplice estrazione (a sinistra) e a destra a flusso bilanciato (da CEN TR 14788)

In generale i sistemi di ventilazione meccanica possiedono il grande vantaggio, a differenza delle tecniche di ventilazione naturale, di poter avere un controllo sulle portate di aria (costanti o variabili a seconda dell'impianto); ciò risulta molto utile per l'abbattimento dei contaminanti *indoor* ed evitare la formazione di muffe garantendo l'immissione di aria pulita e filtrata.

3.2.5 Ventilazione ibrida

I sistemi di ventilazione ibrida, come sottolinea il nome stesso, sono caratterizzati dall'associazione dei principi della ventilazione naturale con quelli della ventilazione meccanica; grazie a dispositivi di controllo automatico è possibile usufruire dell'una o dell'altra tecnica. Esistono diverse tipologie di utilizzo:

- Ventilazione naturale e meccanica in mutua esclusione: il sistema di controllo sceglie in automatico la tecnica di ventilazione migliore da utilizzare in base alle condizioni al contorno (temperatura, occupazione, stagione)
- Ventilazione naturale assistita: l'impianto di ventilazione naturale è affiancato da una rete di estrazione o immissione
- Ventilazione meccanica assistita: gli impianti meccanici di ventilazione utilizzano le componenti naturali al fine di contenere i consumi energetici.

3.3 Tecnologia della ventilazione

In questo paragrafo si inquadra la tecnologia costruttiva dei diversi sistemi di ventilazione precedentemente descritti dal punto di vista qualitativo-teorico; a tal fine si ricorda come l'aerazione e l'infiltrazione involontaria, in quanto non supportate da un progetto, non possano essere considerate a tutti gli effetti dei sistemi di ventilazione.

In particolare verranno trattati i sistemi di ventilazione naturale, di ventilazione meccanica a semplice estrazione (a portata fissa o variabile), a flusso bilanciato (con recuperatore di calore statico o termodinamico) per concludere con un excursus sui vari componenti tecnologici di cui questi sistemi sono composti.

Nella scelta tra le varie soluzioni presenti va preservato il fondamentale concetto di "sistema edificio-impianto": le progettazioni architettonica e impiantistica (di una nuova costruzione o una riqualificazione di un edificio esistente) devono essere integrate e compenstrate e non una conseguente all'altra come capita molto spesso oggi, al fine di evitare in fase di costruzione ulteriori oneri o soluzioni di ripiego.

Come già sottolineato in precedenza tutti i sistemi vengono posti in opera immettendo aria di rinnovo negli ambienti maggiormente frequentati (soggiorni, camere da letto) ed estraendo aria "viziata" dagli ambienti che vedono la produzione di vapore acqueo e anidride carbonica (cucina e bagno).

3.3.1 Sistemi di ventilazione naturale

I sistemi che sfruttano i principi delle tecniche di ventilazione naturale (effetto del vento ed effetto camino) sono solitamente caratterizzati dalla presenza di dispositivi di ingresso dell'aria di rinnovo nei soggiorni e nelle camere da letto a livello di infisso e di bocchette di estrazione collegate o direttamente con l'esterno o con camini a tiraggio naturale (Figura 3-20).

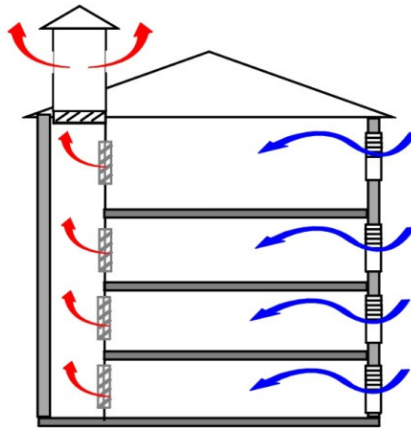


Figura 3-20 - Funzionamento di un sistema di ventilazione naturale in edificio multipiano con camino a tiraggio naturale (Fonte: Titan Products)

Molto spesso in edifici multipiano si utilizzano per queste tipologie di impianti parti dell'edificio stesso, come ad esempio i vani scala: essendo ambienti a tutta altezza possono fungere da camini prevedendo l'espulsione dell'aria a tetto.

Quando l'immissione di aria pulita è lasciata all'utenza attraverso l'apertura delle finestre, nel caso indicato in Figura 3-20 si verificherebbe, a causa dell'effetto camino, un inevitabile scompenso tra i piani inferiori (che godrebbero di una portata maggiore) e quelli superiori (Figura 3-21).

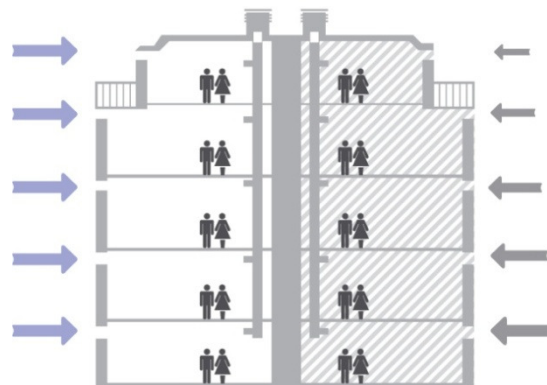


Figura 3-21 - Bilanciamento (a sinistra) e sbilanciamento (a destra) delle portate di aria in abitazioni collettive con e senza dispositivi di controllo della portata (Fonte: Aereco)

Si tratta quindi di adottare soluzioni che permettano il controllo e la regolazione della portata di aria in ingresso. Sul mercato sono disponibili diversi prodotti che si differenziano per principio di funzionamento: dispositivi con regolatori autoazionati, igrosensibili o ad attuatori elettrici per serramenti.

3.3.1.1 Dispositivi di immissione controllata dell'aria

Dispositivi con regolatore auto azionato

Questa soluzione permette di mantenere un ingresso di aria a portata costante, entro i limiti imposti dai produttori, solitamente posizionati a livello di infisso. Il principio di funzionamento è molto semplice: una aletta autoregola la propria posizione riducendo o aumentando la sezione di passaggio dell'aria in funzione della pressione esterna indotta dal vento. (Figura 3-22)

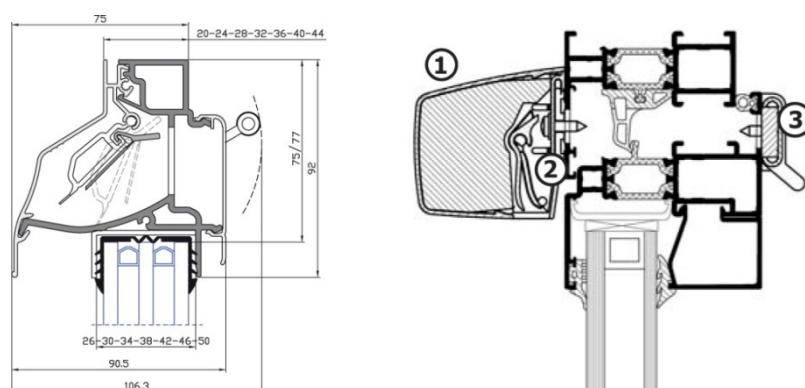


Figura 3-22 - Dispositivi di ingresso dell'aria con regolatori auto azionati (Fonte: Renson)

Attuatori elettrici e a cremagliera per infissi

Questi dispositivi (Figura 3-23) permettono l'apertura di finestre e lucernari per l'ingresso e l'espulsione di aria: vengono utilizzate catene o cremagliere che possono essere comandate anche da centraline wireless ed essere dotate di sensori di temperatura, pioggia o vento al fine di poterle programmare per le proprie specifiche esigenze.



Figura 3-23 - Attuatori elettrici a catena o cremagliera per infissi (Fonte: D+H)

Dispositivi igrosensibili

Tali apparecchiature hanno l'obiettivo di permettere l'ingresso o l'uscita di aria in funzione dell'umidità relativa interna degli ambienti: in questo modo è possibile ventilare le stanze occupate e limitare le portate negli ambienti meno o del tutto non occupati. All'interno di un alloggio avremo quindi un comportamento diverso tra il giorno e la notte, come visibile in Figura 3-24.

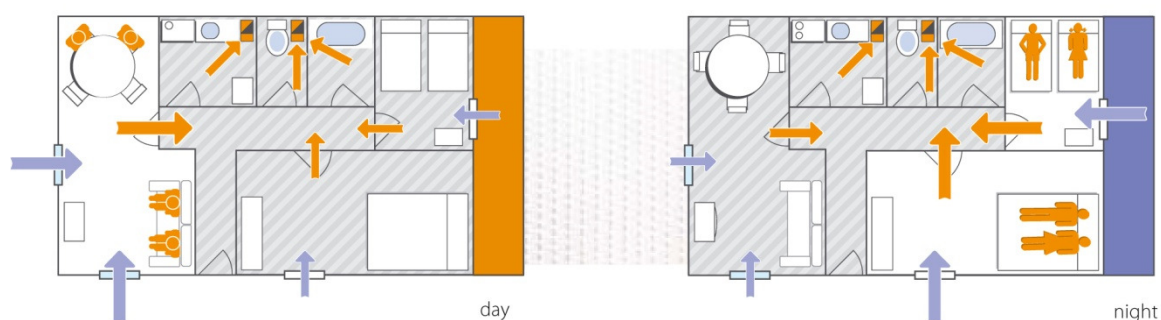


Figura 3-24 - Funzionamento diurno e notturno di un sistema di ventilazione naturale dotato di ingressi di aria igrosensibili (Fonte: Aereco)

Durante il giorno l'aria viene richiamata dalla zona maggiormente occupata (il soggiorno) nella quale gli abitanti fanno aumentare l'umidità relativa, mentre di notte l'aria è richiamata nelle camere da letto. Dal punto di vista tecnologico questi dispositivi sono costituiti da una membrana o un fascio di fili di polimero che modifica la sua dimensione in funzione dell'umidità relativa interna a cui è esposta. Contraendosi e riducendosi (variazioni di 2-5 mm/m ogni variazione di 10% di umidità relativa (Raisa, et al., 2010)) questa membrana agisce su un meccanismo che controlla e regola la posizione di un'aletta per il passaggio dell'aria (Figura 3-25).

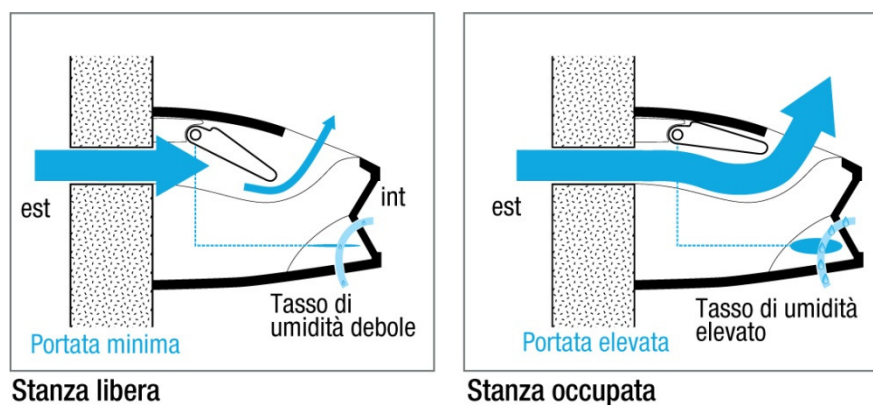


Figura 3-25 - Principio di funzionamento dei dispositivi igrosensibili (Fonte: Aldes)

In Figura 3-26 vengono riportate alcune immagini di bocchette di immissione di aria disponibili sul mercato.

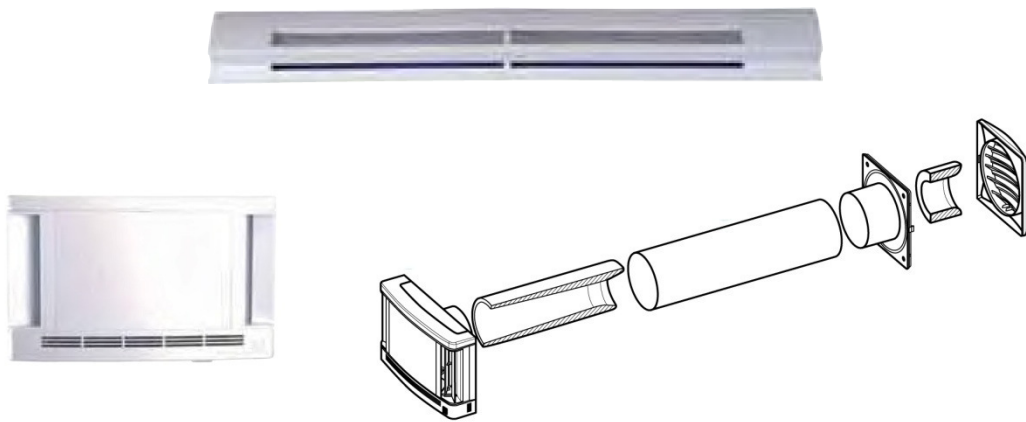


Figura 3-26 - Dispositivi di immissione igroregolabili per installazione a infisso (in alto) e a muro (in basso) e spaccato assometrico con i vari componenti per installazione a muro (Fonte: Aldes)

3.3.1.2 Rete di estrazione

La rete di estrazione è costituita dai componenti visibili in Figura 3-27: in particolare i condotti devono essere dimensionati in base ai dispositivi di estrazione dell'aria. L'aria "viziata" viene quindi espulsa a tetto, dove è possibile utilizzare particolari torrini con basse perdite di carico.

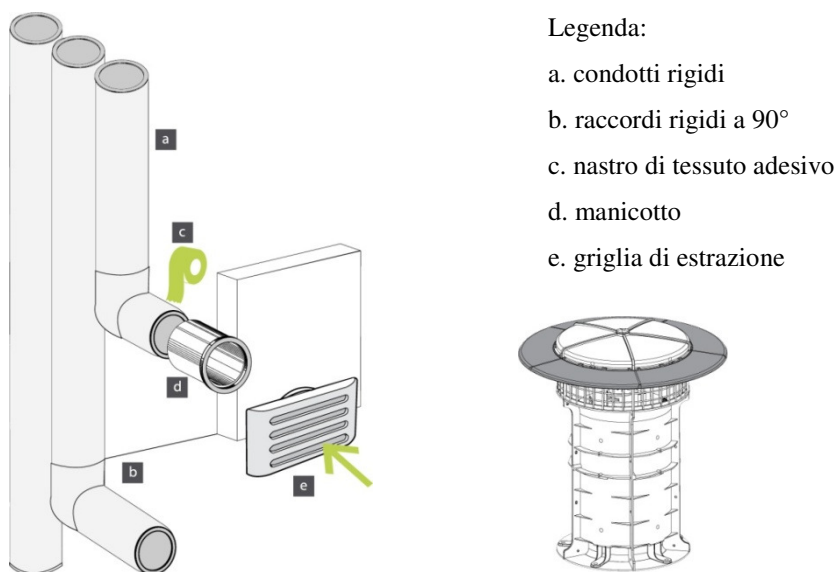
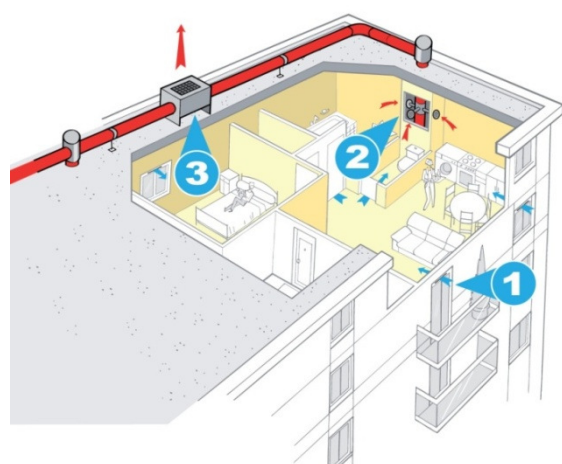


Figura 3-27 - Componenti della rete di estrazione e torrino per installazione a tetto (Fonte: Aereco)

3.3.2 Sistemi di ventilazione meccanica a semplice estrazione

Si tratta del sistema più semplice ed immediato di ventilazione meccanica: l'estrazione avviene mediante ventilatori che aspirano aria richiamandola da appositi ingressi.



Legenda:

1. Dispositivi di ingresso aria
2. Bocchette di estrazione aria
3. Ventilatore di estrazione

Figura 3-28 - Sistema di ventilazione meccanica a semplice flusso per abitazioni collettive (Fonte: Aldes)

In Figura 3-28 è visibile un esempio di tale sistema per abitazioni collettive: lo schema è analogo per abitazioni individuali.

Esistono due tipologie principali:

- Sistemi a portata fissa
- Sistemi a portata variabile

Nel primo caso la portata d'aria è costante grazie all'adozione di dispositivi di regolazione autoazionati che possono essere installati a livello di cassetto o di infisso (si veda il par. 3.3.3.1).

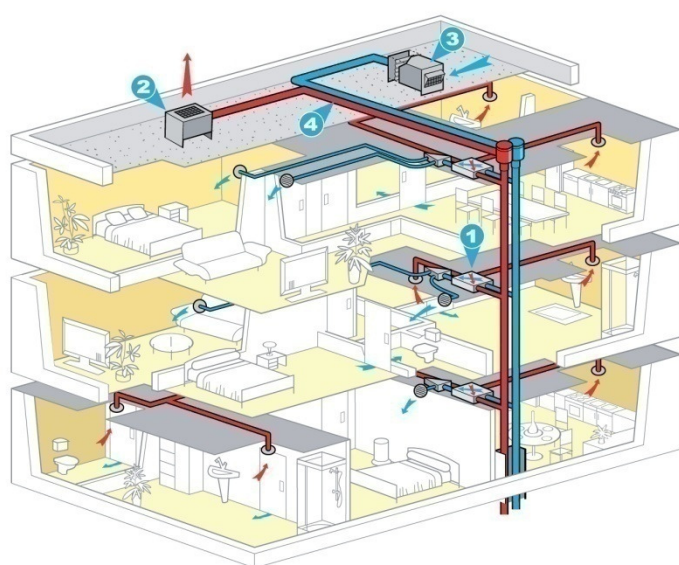
La variabilità della portata è garantita, nel secondo caso, con il controllo della velocità del ventilatore che può avvenire o manualmente, collegandolo ad esempio con un interruttore (molto spesso nei bagni è associato all'interruttore della luce) o automaticamente, utilizzando dei sensori di umidità, CO₂, particolari inquinanti; un esempio è costituito dagli ingressi di aria igroregolabili, che lavorano in funzione dell'umidità relativa interna, descritti al paragrafo 3.3.1.3.

3.3.3 Sistemi di ventilazione meccanica bilanciata

I sistemi di ventilazione meccanica bilanciata differiscono da quelli a semplice estrazione per la presenza di una doppia rete aeraulica: una per l'aria di rinnovo da immettere nei soggiorni e nelle camere da letto e una rete per l'estrazione che avviene nei bagni e nelle cucine, ciascuna con il proprio ventilatore. Il termine "bilanciata" indica una equivalenza tra la portata di immissione e quella di estrazione, anche se nella pratica si mantiene l'intero alloggio in leggera sovrappressione per evitare l'ingresso di eventuali odori o inquinanti dall'esterno.

Le migliori *performance* di questo sistema si raggiungono con l'introduzione nell'impianto di un recuperatore di calore, statico o termodinamico. Negli ultimi tempi si stanno diffondendo i cosiddetti sistemi SRHR (*Single Room Heat Recovery*) che evitano la posa di reti aerauliche con recupero di calore per singolo ambiente.

In Figura 3-29 è riportato lo schema di un impianto di VMC bilanciato semicentralizzato per abitazioni collettive: si utilizzano ventilatori centralizzati e recuperatori di calore individuali per evitare "furti di calore" nel caso questi ultimi fossero centralizzati, da parte di appartamenti non riscaldati. Analogo è lo schema per le abitazioni individuali.



Legenda:

1. recuperatore di calore individuale
2. ventilatore di estrazione
3. ventilatore di immissione
4. canali di ventilazione

Figura 3-29 - Schema di sistema di ventilazione meccanica bilanciata semicentralizzata per abitazioni collettive (Fonte: Aldes)

I principali componenti degli impianti verranno trattati più approfonditamente nel paragrafo successivo: qui si vuole solamente descrivere la differenza tra i recuperatori statici e termodinamici.

La principale differenza consiste nel fatto che i recuperatori termodinamici sono costituiti da una pompa di calore aria-aria che sfrutta, invece che l'aria esterna, una sorgente a temperatura più favorevole, l'aria espulsa, permettendo così di ottenere efficienze (COP) più elevate. Questo sistema permette, in inverno, di poter riscaldare il flusso in immissione anche ad una temperatura superiore di quella ambiente, andando di fatto a costituire un sistema integrativo di riscaldamento. Inoltre, se la pompa è a funzionamento invertibile, è possibile realizzare un raffrescamento con deumidificazione, cosa che i recuperatori statici non consentono. Esistono, infine, sistemi combinati in cui si fa precedere lo scambio termico al recuperatore termodinamico; tuttavia queste applicazioni, per le dimensioni notevoli dei componenti, sono per ora limitate agli edifici del settore terziario.

3.4 Componenti dei sistemi di ventilazione

In questo paragrafo vengono descritti i principali componenti tecnologici dei sistemi di ventilazione. Dei terminali di immissione ed estrazione si è già parlato nei paragrafi 3.3.1.1 e seguenti per cui verranno analizzati: condotti di ventilazione, i ventilatori, recuperatori di calore, attenuatori acustici, filtri, serrande e batterie di riscaldamento o raffreddamento.

3.4.1 Condotti aeraulici

La rete degli impianti di ventilazione è composta da canali a sezione variabile che possono essere realizzati in lamiera di acciaio zincato (a sezione rettangolare o circolare spiralata (Figura 3-30)), in PVC o con condotti flessibili (Figura 3-31).

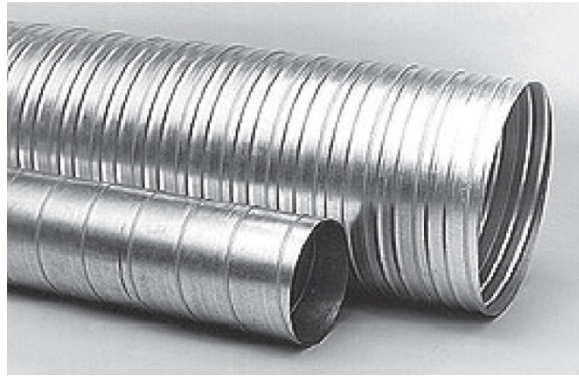


Figura 3-30 - Canali in lamiera zincata a sezione rettangolare e circolare spiralata (Fonte: TuboSystem)



Figura 3-31 - Canali in PVC e flessibili (Fonte: Aldes)

Nel caso di ridotto spazio a disposizione per la posa in opera dei canali (ad esempio per ristrutturazioni) sono disponibili sul mercato condotti di sezione ovale schiacciata realizzati solitamente in PVC (Figura 3-31 a sinistra) o in acciaio zincato spiralato (Figura 3-32), per installazione in controsoffitti o nello spessore dei divisori.



Figura 3-32 - Canali di acciaio zincato ovali spiralate (Fonte: TuboSystem)

In fase di progettazione è importante contenere le velocità dell'aria nei condotti per evitare problemi di rumore, valutare le perdite di carico, prevedere tutti gli accessori

(Figura 3-33) per una corretta installazione della rete (guarnizioni, curve, raccordi, riduzioni, staffe) nonché l'eventuale coibentazione di alcuni tratti dell'impianto. (Figura 3-34)

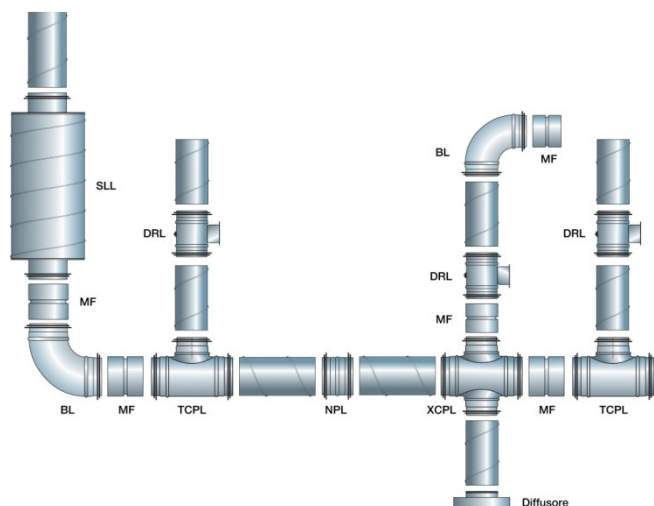


Figura 3-33 - Schema di montaggio di una rete a condotti circolari spiralati (Fonte: TuboSystem)



Figura 3-34 - Condotto flessibile isolato (Fonte: Aldes)

3.4.2 Ventilatori

I ventilatori hanno il compito di movimentare l'aria all'interno dei canali, fornendole l'energia necessaria per vincere le perdite di carico generate dai canali (distribuite e concentrate) e dai terminali di immissione ed estrazione.

Esistono due tipologie principali, centrifughi e assiali che si differenziano essenzialmente per la direzione del flusso attraverso la girante (Figura 3-35).



Figura 3-35 - Ventilatore centrifugo (Fonte: Nicotra) e assiale (Fonte: Systemair)

Il ventilatore assiale è fondamentalmente simile alle pale di un aereo. L'aria immessa ha direzione parallela all'asse di rotazione e in uscita viene scaricata dalla pala su tutta la sua lunghezza mentre nel ventilatore centrifugo tutta l'aria viene espulsa dal centro verso l'esterno (appunto in maniera centrifuga). Dal punto di vista prestazionale i ventilatori centrifughi movimentano portate d'aria moderate ma con pressioni statiche alte mentre quelli assiali muovono grandi portate d'aria ma con bassi valori di pressione statica. Nelle applicazioni di impianti di ventilazione per edifici residenziali sono utilizzati solitamente i ventilatori centrifughi. Le prestazioni di un ventilatore possono essere efficacemente lette su un diagramma attraverso la curva caratteristica (Figura 3-36). Sull'asse delle ascisse è indicata la portata di aria mentre sulle ordinate la pressione totale (in altri casi si può avere la pressione statica, il rendimento, la potenza meccanica assorbita, ecc.). E' possibile individuare sulla curva caratteristica un punto che corrisponde al rendimento massimo del ventilatore in corrispondenza del quale, oltre al minore assorbimento di potenza, si assiste al più basso livello di emissione sonora, valutato in dB(A).

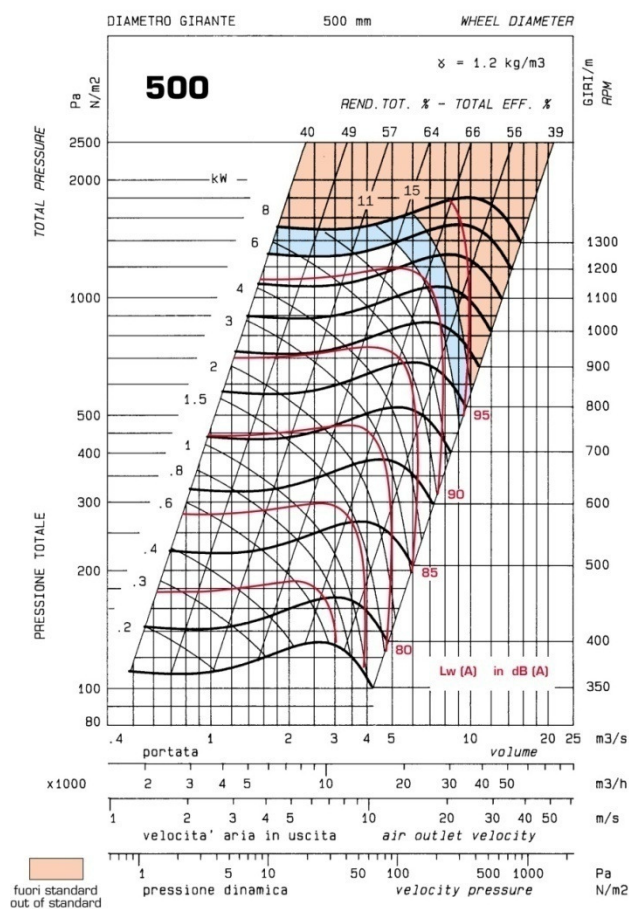


Figura 3-36 - Diagramma pressione-portata per ventilatore centrifugo (Fonte: Aspirnova)

Il produttore dichiara un *range* di funzionamento soddisfacente del ventilatore: è visibile in figura un'area colorata in rosa che raccoglie punti in cui il ventilatore possiede caratteristiche insoddisfacenti dal punto di vista del rendimento, dei costi e della rumorosità. In Figura 3-36 sono riportati altri parametri: la prevalenza, il rendimento e la velocità di rotazione.

La prevalenza è la somma della pressione statica e dinamica. La pressione statica (p_s) è l'energia potenziale utilizzata per poter vincere le resistenze opposte dalla rete al passaggio dell'aria. La pressione dinamica (p_d) è invece l'energia cinetica che possiede l'aria in movimento e dipende dalla velocità del fluido che esce dalla girante.

Il rendimento rappresenta il rapporto tra l'energia fornita dal ventilatore all'aria e l'energia necessaria per azionare il ventilatore. A tal proposito si sottolinea come gli assorbimenti elettrici dei motori, per impianti a singoli alloggi, siano molto contenuti, variando tra pochi a un centinaio di Watt (Raisa, et al., 2010).

La velocità di rotazione della girante è indicata in numero di giri al minuto.

I ventilatori si compongono di diverse parti: la girante, la cassa esterna, il basamento, la trasmissione e gli organi di regolazione.

La girante è dotata di pale, disponibili in tipologie differenti (Calza, 2005):

- Pale curve rovesce
- Pale curve avanti
- Pale diritte (radiali)

L'ultimo tipo di girante possiede il rendimento più basso ed è utilizzato quando si devono far passare attraverso il ventilatore delle polveri, ad esempio in applicazioni industriali; la costruzione delle pale è tale da impedire il deposito dei materiali solidi e la conseguente sbilanciatura della girante. Le pale rovesce possiedono il miglior rendimento ma con macchine più ingombranti e vengono perciò utilizzate quando il costo di esercizio è più importante di quello di installazione, cioè quando la macchina è sempre in funzione. Inoltre per questo tipo di giranti la potenza assorbita dopo il punto di massimo rendimento tende a diminuire con l'aumentare della portata, cosa che non avviene con le pale in avanti. Le pale curve avanti risultano essere vantaggiose per minore ingombro, minor peso (quindi minor costo), minore velocità delle pale (quindi minor rumore) quindi per le piccole installazioni quando il costo iniziale è preponderante rispetto a quello di esercizio. Il basamento del ventilatore deve essere montato su supporti antivibranti per evitare la trasmissione di vibrazioni, soprattutto se installato in locali sottotetto o in copertura.

La girante è collegata ad un motore elettrico tramite trasmissione a cinghia o in maniera diretta (Figura 3-37).

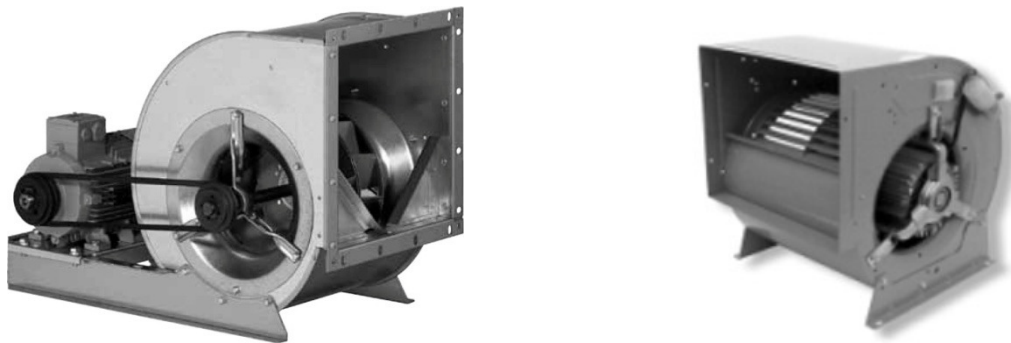


Figura 3-37 - Ventilatore centrifugo con trasmissione a cinghia (Fonte: Nicotra) e ad accoppiamento diretto (Fonte: Rafipal)

Tra i motori di nuova generazione si trovano i motori EC che, grazie al sistema di commutazione elettronica, assicurano il funzionamento ottimale di tutti i componenti garantendo un notevole risparmio di energia: la loro applicazione principale sono i sistemi di ventilazione a servizio dei locali igienici degli alberghi, caratterizzati da una notevole variabilità dei carichi nel tempo.

3.4.3 Recuperatore di calore

“Il recuperatore di calore è uno scambiatore di calore o una combinazione di scambiatori di calore, che permette un trasferimento di calore e, in alcuni casi, di umidità tra il flusso di aria di scarico ed il flusso di aria di alimentazione, sotto l’azione di una differenza tra i livelli di temperatura e di umidità. Il recuperatore di calore è generalmente installato in alloggiamenti con adeguati collegamenti ai condotti dell’aria.” Questa è la definizione di recuperatore di calore secondo la norma UNI EN 308:1998, che riguarda i metodi di prova per stabilire le prestazioni dei recuperatori aria-aria. I principali recuperatori utilizzati in campo residenziale sono del tipo a piastre in alluminio, statici, quindi senza parti in movimento. Il funzionamento è molto semplice: il flusso di aria di rinnovo e di quella di espulsione, all’entrata nel recuperatore vengono suddivisi in passaggi (adeguatamente sigillate per evitare contaminazioni tra i flussi) compresi tra due piastre che portano rispettivamente aria calda e aria fredda. In Figura

3-38 è visibile un recuperatore a cui è stato tolto il coperchio superiore mostrando la parte centrale con le piastre, cuore del recuperatore.

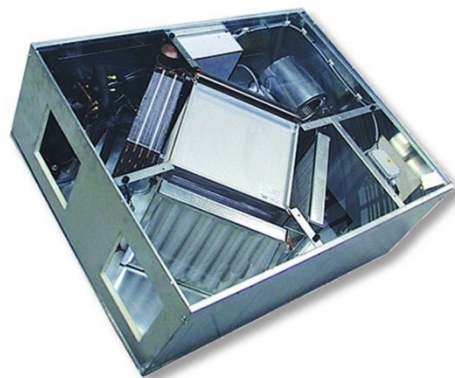


Figura 3-38 - Recuperatore di calore a piastre (Fonte: Aermec)

Il parametro che caratterizza le prestazioni di un recuperatore è l'efficienza che può essere riferita al calore sensibile, all'entalpia o all'umidità ed è definita come il rapporto tra il flusso termico scambiato tra le due correnti e il massimo flusso termico scambiabile tra esse a parità di temperature di ingresso dei fluidi. L'efficienza è quindi un parametro che dipende dalle portate e dalle temperature in gioco per cui risulta variabile durante l'anno. A seconda della dimensione dello scambiatore i recuperatori si dividono in due tipologie: a flussi incrociati e controcorrente. Si differenziano essenzialmente per forma ed efficienze: i recuperatori a flussi incrociati hanno forma quadrata e efficienze tra il 50 e il 70%. I recuperatori controcorrente hanno forma esagonale, e possono raggiungere anche efficienze superiori al 90%. (Figura 3-39)

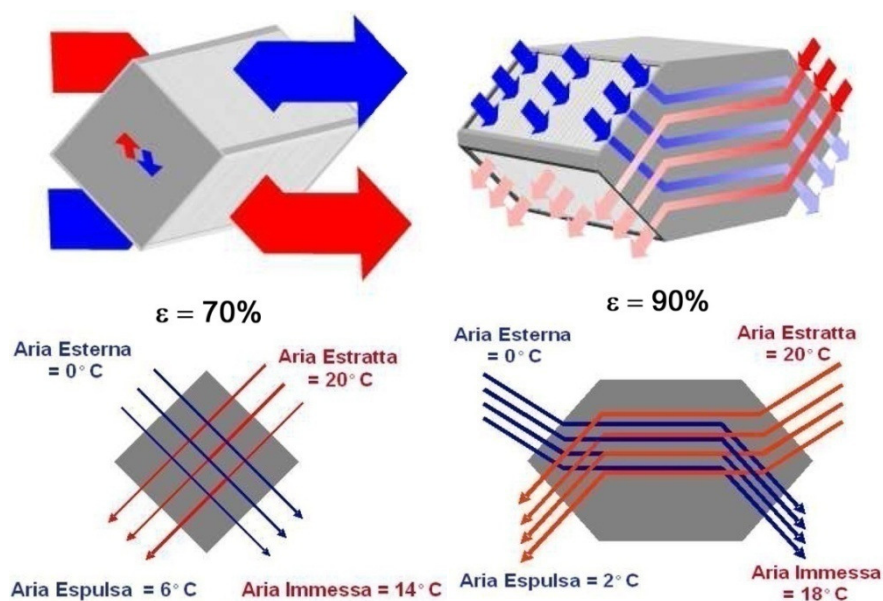
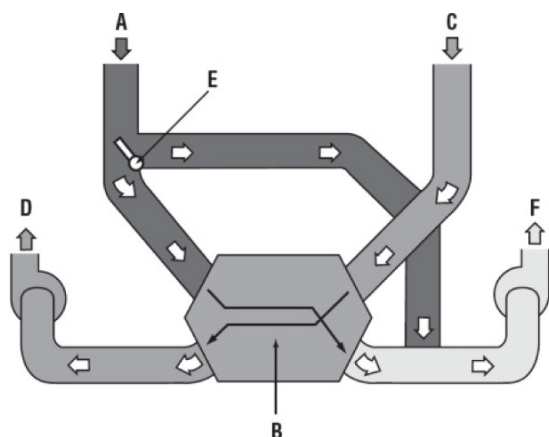


Figura 3-39 – Recuperatori a flussi incrociati e controcorrente (Fonte: Recuperator)

Il vantaggio del recupero di calore è indubbio nel periodo invernale; potrebbe essere invece controproducente nel periodo estivo in quanto si preferirebbe avere immessa aria esterna senza essere preriscaldata. Per questo motivo è stato introdotto il by-pass che permette, in maniera automatica o manuale, di evitare che l'aria attraversi il recuperatore, rinfrescando i locali durante le ore notturne in estate (principio del *free-cooling*). (Figura 3-40)



Legenda

- A. Aria viziata estratta
- B. Scambiatore di calore
- C. Aria immessa nello scambiatore
- D. Aria immessa negli ambienti
- E. By-pass
- F. Aria espulsa in atmosfera

Figura 3-40 - Schema di funzionamento del by-pass (Fonte: Zehnder)

Attraverso l'utilizzo di speciali setti divisorii nello scambiatore costituiti da una speciale carta trattata che consente la migrazione di vapore acqueo (dal lato con maggiore a quello con minore umidità), è possibile il recupero di calore totale, sensibile e latente, rimanendo al contempo in dimensioni uguale ai recuperatori di solo calore sensibile (Figura 3-41).

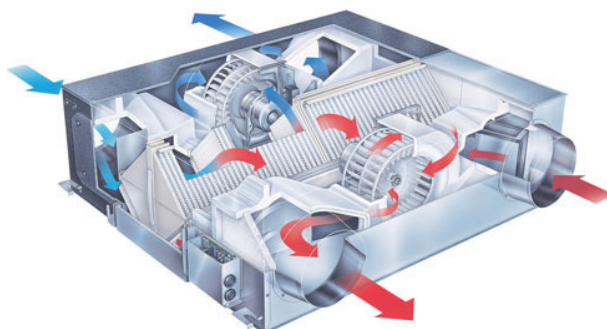


Figura 3-41 - Recuperatore di calore sensibile e latente (Fonte: Mitsubishi Electric)

Tra le altre tipologie di recuperatori si ricordano quello rotativo e quello termodinamico. Il recuperatore di tipo rotativo (Figura 3-42 a sinistra) è costituito da un rotore realizzato

in lamiera pieghettata a cui, nella rotazione, l'aria espulsa cede il proprio calore che viene, nel suo movimento ceduta a sua volta all'aria di rinnovo e così via. Il recuperatore di calore termodinamico (Figura 3-42 a destra) include al suo interno una pompa di calore che permette di preriscaldare l'aria ad una temperatura superiore a quella ambiente (si rimanda al paragrafo 3.3.3)

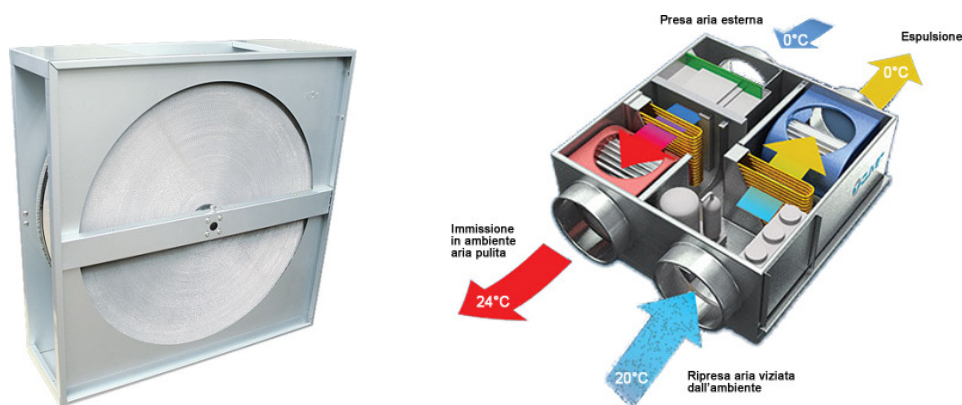


Figura 3-42 - Recuperatore rotativo (Fonte: Recuperator) e recuperatore termodinamico (Fonte: Clivet)

3.4.4 Altri componenti

3.4.4.1 Attenuatori acustici

La turbolenza generata dalle pale del ventilatore costituisce una fonte di rumore che si propaga all'interno della rete aeraulica. Per poterla ridurre si utilizzano appositi silenziatori (attenuatori acustici) che possono essere passivi o attivi.

I primi sono essenzialmente costituiti da un involucro con setti realizzati da materiale fonoassorbente. In particolare i silenziatori passivi di forma cilindrica (Figura 3-43) sono costituiti da un tubo (che può o meno presentare un'ogiva centrale) rivestito all'interno da materiale fonoassorbente, ricoperto da una lamina metallica forata.



Figura 3-43 - Silenziatori di tipo passivo circolari senza e con ogiva centrale (Fonte: Aldes)

I silenziatori a forma rettangolare (Figura 3-44) sono costituiti da diversi pannelli paralleli in materiale assorbente: il loro compito è quello di dividere il flusso di aria in diverse sezioni per avere un maggior contatto tra le onde sonore e il materiale fonoassorbente.



Figura 3-44 - Silenziatore passivo rettangolare a setti (Fonte: Roccheggiani)

I silenziatori attivi (Figura 3-45) sono invece basati su un diverso funzionamento: un microfono posto all'interno dell'attenuatore rileva il rumore emesso dal ventilatore. Un altoparlante a valle emette un rumore con opposta fase e ritardato del tempo che il suono impiega a percorrere lo spazio tra il microfono e l'altoparlante, neutralizzando l'onda sonora iniziale.



Figura 3-45 - Silenziatore circolare attivo (Fonte: Aldes)

La differenza tra i silenziatori attivi e passivi consiste nel fatto che i primi hanno maggiore efficienza nel campo delle basse frequenze (caratteristico del rumore emesso dai ventilatori) mentre quelli passivi presentano una maggiore attenuazione con le frequenze medio-alte.

3.4.4.2 Filtri

Senza entrare nel dettaglio della descrizione dei meccanismi di filtrazione esistenti (inerzia, intercettazione, diffusione, attrazione elettrostatica) si vogliono mostrare vantaggi e rischi della filtrazione. La filtrazione è possibile quando si è in grado di

controllare l'aria di rinnovo: ciò avviene solo nel caso di ventilazione meccanica bilanciata grazie alla presenza di una rete aeraulica di mandata. Negli altri sistemi si possono al massimo munire i dispositivi di ingresso dell'aria di reti per la protezione dagli insetti.

La scelta tra le varie tipologie di filtri in commercio è fondamentale per ottenere negli ambienti un determinato grado di qualità dell'aria per la protezione della salute umana (come ad esempio riportati nella bozza di revisione della UNI 10339 – Elevata, Media, Bassa). E' altrettanto fondamentale, negli impianti di ventilazione meccanica, effettuare una manutenzione periodica e corretta al fine di evitare problemi legati al malfunzionamento del sistema e alla qualità dell'aria: numerosi sono gli studi che hanno mostrato come i filtri possano diventare essi stessi sorgenti di inquinanti, andando ad avere un impatto negativo sulla qualità dell'aria percepita, sui sintomi legati alla SBS e sulle prestazioni lavorative. (Clausen, 2004)

La norma di riferimento è la UNI EN 779:2005 che classifica i filtri in base alla loro efficienza: i materiali più utilizzati sono le fibre di cellulosa, sintetiche, di vetro o in plastica le quali, potendo essere caricate elettricamente, permettono una maggiore efficienza nei confronti delle particelle fini.

3.4.4.3 Batterie di riscaldamento o raffreddamento

Negli impianti di ventilazione è possibile, attraverso batterie ad acqua o elettriche, effettuare una vera e propria climatizzazione. Nonostante l'utilizzo di energia elettrica per il riscaldamento tramite resistenze non sia per nulla vantaggioso dal punto di vista energetico, questa soluzione si può considerare accettabile se collegate all'utilizzo di fonti rinnovabili di energia. Le batterie ad acqua sono scambiatori di calore aria/acqua realizzati con tubi alettati, solitamente utilizzati all'interno delle unità di trattamento aria (UTA) per pre-riscaldare, raffreddare e deumidificare e post-riscaldare.

Le batterie elettriche (Figura 3-46) sono costituite da una resistenza rivestita da acciaio inox e protette contro i surriscaldamenti da un dispositivo a riarmo automatico.



Figura 3-46 - Batterie elettriche per canali di ventilazione (Fonte: Secas)

3.4.4.4 Dispositivi per la variazione della portata d'aria

Con l'utilizzo di serrande e moduli di regolazione è possibile andare a regolare la portata ad esempio in alcuni ambienti, con sensori di presenza o a comando manuale.

In Figura 3-47 sono visibili una classica serranda motorizzata e un modulo di regolazione a doppia portata che, con un meccanismo azionato elettricamente, permette di variare la portata impostandola su due valori estremi, uno minimo e uno massimo.



Figura 3-47 - Serranda motorizzata (Fonte: TuboSystem) e modulo di regolazione a doppia portata (Fonte: Aldes)

4 APPLICAZIONE AD UN CASO DI STUDIO: EDIFICIO NEL QUARTIERE PEEP DI CORTICELLA

4.1 Inquadramento

L'edificio oggetto dello studio è sito nel quartiere di Corticella alla periferia nord della città di Bologna, in via Gorki 19-21-23-25 (evidenziato in Figura 4-1).

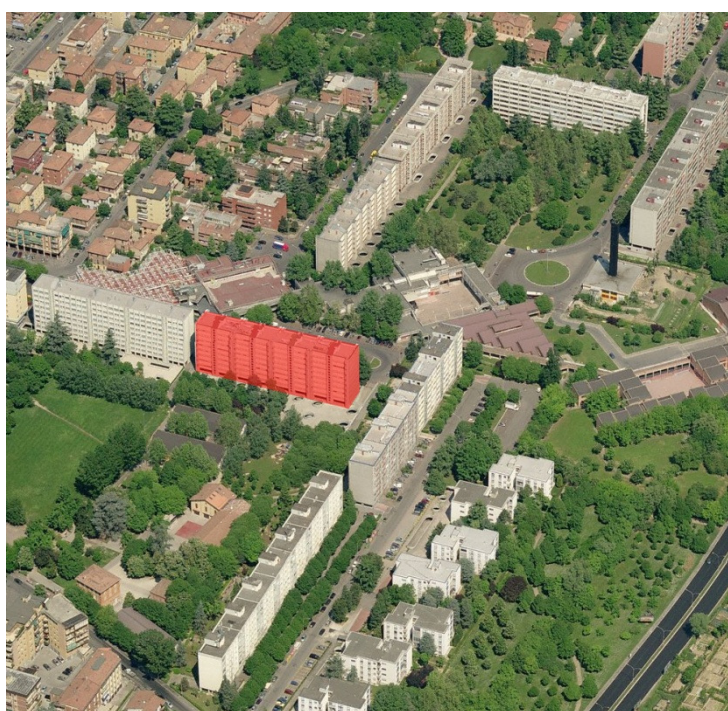


Figura 4-1 - Inquadramento urbanistico dell'edificio oggetto di studio

Si tratta di un edificio a tipologia in linea a 8 piani, con orientamento Est-Ovest, la cui costruzione è stata terminata nel 1970.

L'impianto distributivo è costituito da quattro vani scala che servono ciascuno due appartamenti, per un totale di 64 appartamenti, tutti doppio affaccio Nord-Sud e con metrature variabili tra 70 e 120 m² di superficie utile (Figura 4-2 e Figura 4-3).

L'edificio è dotato di una sottostazione impiantistica a servizio di una rete di teleriscaldamento (Figura 4-4), facente capo alla centrale termica (in Figura 4-1 ne è visibile a fianco della rotonda il notevole camino). Sulla base dei consumi reali è stato ricavato il rendimento della rete di teleriscaldamento, $\eta_{tele} = 0,78$

Il rendimento globale dell'impianto è così ottenuto:

$$\eta_{globale} = \eta_{tele} \cdot \eta_{distribuzione} \cdot \eta_{emissione} = 0,682$$

in cui $\eta_{distribuzione} = 0,94$ e $\eta_{emissione} = 0,93$ (Brandimarti, 2013)

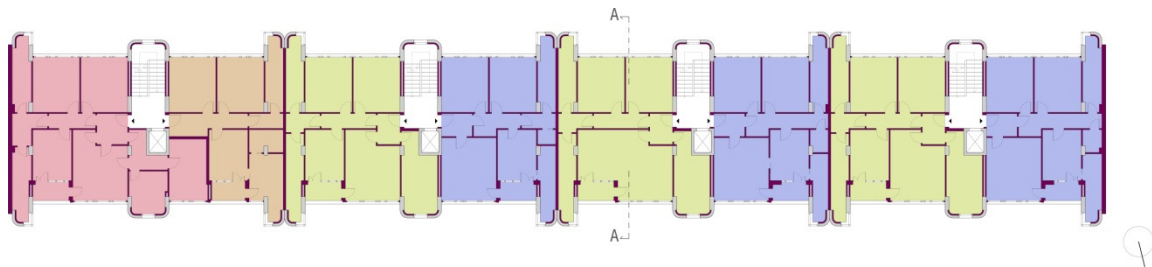


Figura 4-2 - Pianta del piano tipo con le differenti tipologie evidenziati

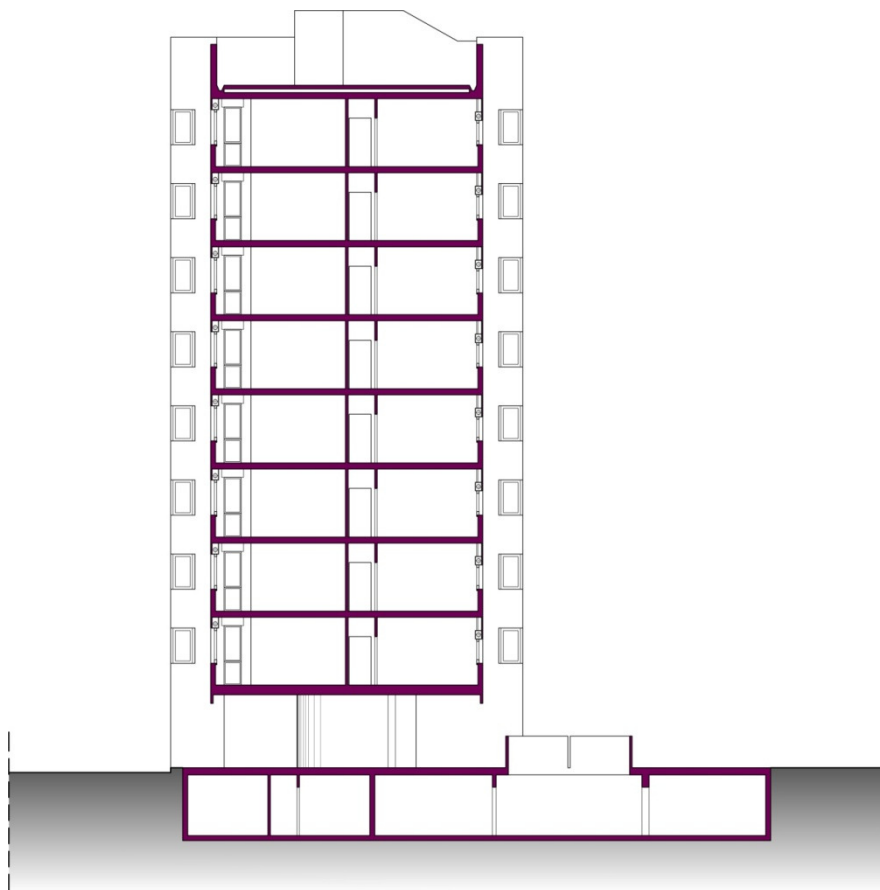


Figura 4-3 - Sezione A-A

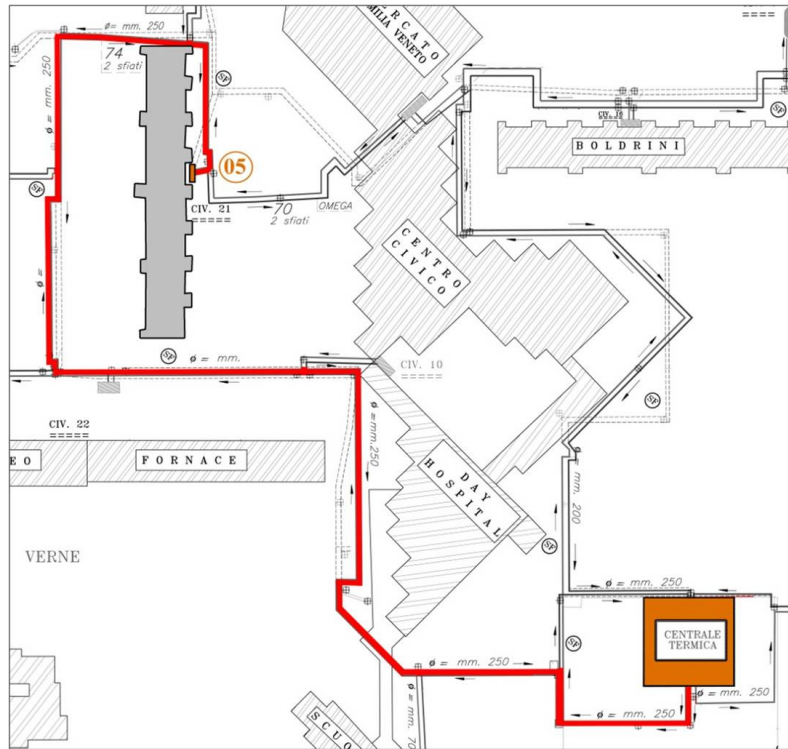
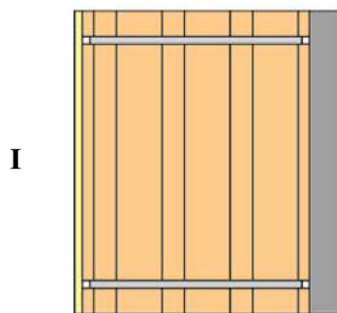


Figura 4-4 - Dettaglio della distribuzione della rete di teleriscaldamento per l'edificio studiato

Si riportano ora i dettagli costruttivi delle stratigrafie murarie dell'edificio nello stato di fatto, nelle quali si può notare una totale assenza di materiale isolante

Parete esterna nord-sud



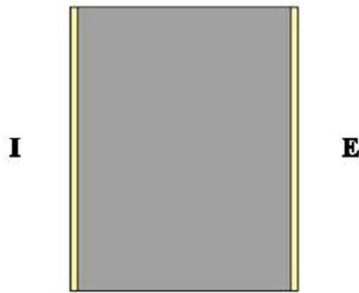
Spessore totale = 35 cm

- Intonaco in calce e gesso sp. 1 cm
- Blocco forato in laterizio 30x25x25 cm
- Veletta in calcestruzzo sp. 4 cm

Trasmittanza termica: $U = 1,075 \left[\frac{W}{m^2 \cdot K} \right]$

Increment. ponti termici 30% $\rightarrow U_{TOT} = 1,398 \left[\frac{W}{m^2 \cdot K} \right]$

Parete esterna est-ovest (dall'interno all'esterno):



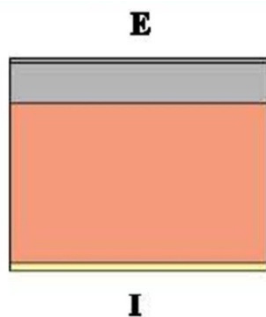
Spessore totale = 31 cm

- Intonaco in calce e gesso sp. 1 cm
- Setto in c.c.a sp. 30 cm

$$\text{Trasmittanza termica: } U = 2,396 \left[\frac{W}{m^2 \cdot K} \right]$$

$$\text{Incr. ponti termici 30\%} \rightarrow U_{\text{TOT}} = 2,875 \left[\frac{W}{m^2 \cdot K} \right]$$

Solaio di copertura (dall'interno all'esterno):

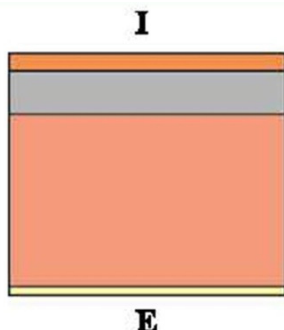


Spessore totale = 26,5 cm

- Intonaco in calce e gesso sp. 1 cm
- Solaio in laterocemento 16+4 cm
- Massetto in cls sp. 5 cm
- Guaina impermeabilizzante sp. 0,5 cm

$$\text{Trasmittanza termica totale: } U = 1,651 \left[\frac{W}{m^2 \cdot K} \right]$$

Solaio piano primo (dall'interno all'esterno):



Spessore totale = 28 cm

- Piastrelle in ceramica sp. 2 cm
- Massetto in cls sp. 5 cm
- Solaio in laterocemento 16+4 cm
- Intonaco sp.1 cm

$$\text{Trasmittanza termica totale: } U = 1,381 \left[\frac{W}{m^2 \cdot K} \right]$$

4.2 Calcolo delle portate di ventilazione

Nello svolgimento dei calcoli presentati in questo paragrafo, si utilizzano le quattro tipologie di appartamenti evidenziati anche in Figura 4-2.

4.2.1 Appartamento 1

Si riporta in Figura 4-5 la pianta dell'appartamento n°2 e in Tabella 4-1 i dati relativi alle superfici e ai volumi dell'alloggio.

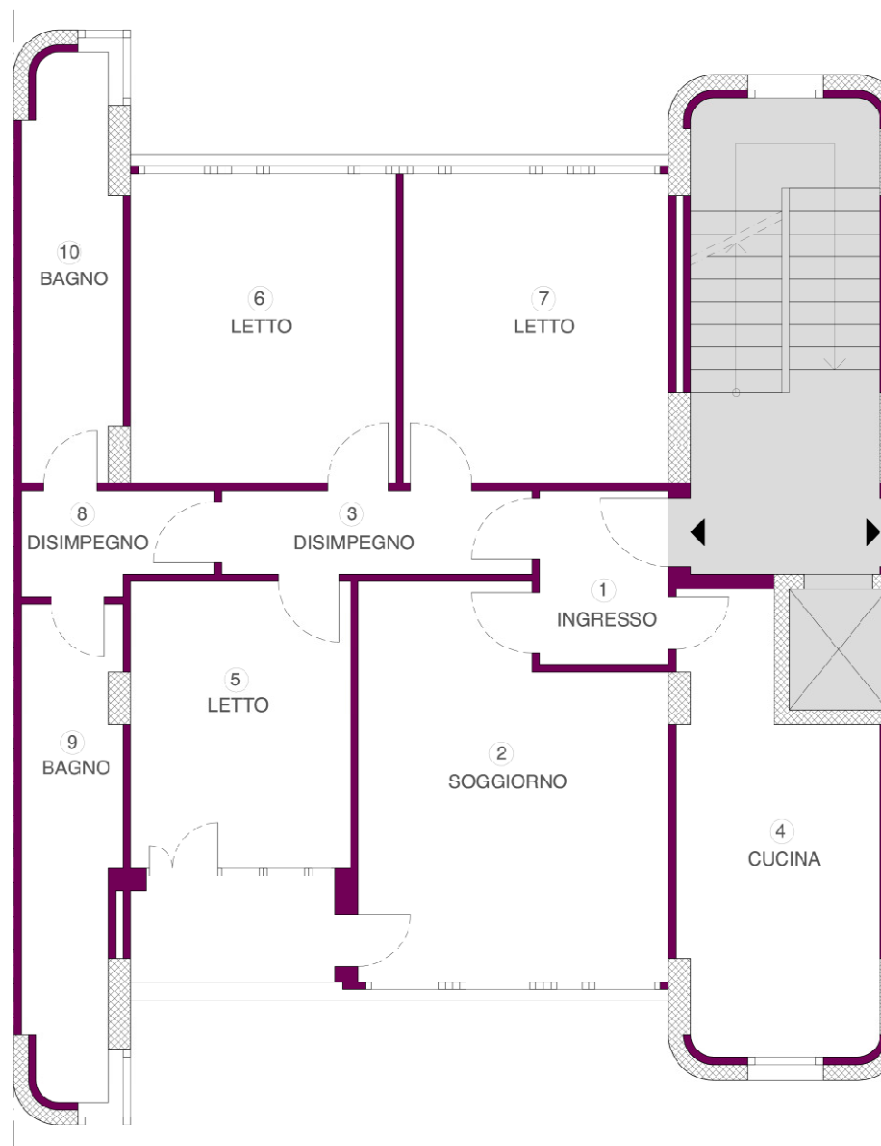


Figura 4-5 - Pianta appartamento 1

Ambiente		SP (m ²)	h (m)	V (m ³)
1	Ingresso	3,9	2,8	10,9
2	Soggiorno	19,8	2,8	55,4
3	Disimpegno	4,5	2,8	12,6
4	Cucina	14	2,8	39,2
5	Letto singolo	10,5	2,8	29,4
6	Letto singolo	14,5	2,8	40,6
7	Letto matrimoniale	14,5	2,8	40,6
8	Disimpegno	3,2	2,8	9,0
9	Bagno	8	2,8	22,4
10	Bagno	7	2,8	19,6
Totale		100	-	279,7

Tabella 4-1 - Dati relativi all'appartamento 1

4.2.1.1 Calcolo delle portate d'aria secondo le varie normative

UNI 10339

$$\text{Indice di affollamento } n_s = 0,04 \left[\frac{\text{pers}}{\text{m}^2} \right]$$

$$\text{Portata d'aria esterna per persona} = 11 \left[\frac{l}{s \cdot \text{pers}} \right]$$

$$\text{Superficie di pavimento totale} = 100 \text{ m}^2$$

$$\text{Affollamento totale} = 0,04 \cdot 100 = 4 \text{ persone}$$

$$\text{Portata d'aria esterna totale} = 11 \cdot 4 = 44 \left[\frac{l}{s} \right] = 158,4 \left[\frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right]$$

$$\text{Tasso di ricambio d'aria} = 158,4/279,7 = 0,57 \text{ h}^{-1}$$

UNI 10339 rev

Classe di qualità dell'aria interna = Media

$$\text{Indice di affollamento } n_s = 0,04 \left[\frac{\text{pers}}{\text{m}^2} \right]$$

$$\text{Superficie di pavimento totale} = 100 \text{ m}^2$$

$$\text{Portata d'aria esterna per persona } q_{v,o,p} = 3 \left[\frac{l}{s \cdot pers} \right]$$

$$\text{Portata d'aria esterna per unità di superficie } q_{v,o,s} = 0,14 \left[\frac{l}{s \cdot m^2} \right]$$

$$\text{Affollamento totale} = 0,04 \cdot 100 = 4 \text{ persone}$$

$$\text{Portata d'aria esterna totale} = 3 \cdot 4 + 0,14 \cdot 100 = 26 \left[\frac{l}{s} \right] = 93,6 \left[\frac{m^3}{h} \right]$$

$$\text{Tasso di ricambio d'aria} = 93,6/279,7 = 0,33 \text{ h}^{-1}$$

ASHRAE 62-1

$$\text{Affollamento massimo } P_z = 4 \text{ persone}$$

$$\text{Superficie di pavimento totale} = 100 \text{ m}^2$$

$$\text{Portata d'aria esterna per persona } R_p = 2,5 \left[\frac{l}{s \cdot pers} \right]$$

$$\text{Portata d'aria esterna per unità di superficie } R_a = 0,3 \left[\frac{l}{s \cdot m^2} \right]$$

$$\text{Portata d'aria esterna totale} = 2,5 \cdot 4 + 0,3 \cdot 100 = 40 \left[\frac{l}{s} \right] = 144 \left[\frac{m^3}{h} \right]$$

$$\text{Tasso di ricambio d'aria} = 144/279,7 = 0,51 \text{ h}^{-1}$$

UNI EN 15251

Categoria di qualità dell'edificio = II – Livello normale di aspettativa

$$\text{Affollamento} = 4 \text{ persone}$$

$$\text{Superficie di pavimento totale} = 100 \text{ m}^2$$

$$\text{Portata d'aria esterna per unità di superficie (totale)} = 0,42 \left[\frac{l}{s \cdot m^2} \right] \text{ (colonna 1)}$$

$$\text{Portata d'aria esterna per persona} = 7 \left[\frac{l}{s \cdot pers} \right] \text{ (colonna 2)}$$

$$\text{Portata d'aria esterna per unità di superficie (sogg. e letti)} = 1 \left[\frac{l}{s \cdot m^2} \right] \text{ (colonna 3)}$$

In base a quanto riportato sulla normativa si esegue il calcolo selezionando il valore più alto tra quelli a cui le 3 differenti colonne conducono:

$$\text{(Colonna 1) Portata d'aria esterna totale: } Q = 0,42 \cdot 100 = 42 \left[\frac{l}{s} \right] = 151,2 \left[\frac{m^3}{h} \right]$$

$$\text{(Colonna 2) Portata d'aria esterna totale: } Q = 7 \cdot 4 = 28 \left[\frac{l}{s} \right] = 100,8 \left[\frac{m^3}{h} \right]$$

$$\begin{aligned} \text{(Colonna 3) Portata d'aria esterna totale: } Q &= 1 \cdot (19,8 + 10,5 + 14,5 + 14,5) = \\ &= 59,3 \left[\frac{l}{s} \right] = 213,48 \left[\frac{m^3}{h} \right] \end{aligned}$$

Il valore massimo da considerare è quello ottenuto con la colonna 3

$$\text{Portata d'estrazione totale: } Q_{\text{estr}} = 20 + 15 + 10 = 45 \left[\frac{l}{s} \right] = 162 \left[\frac{m^3}{h} \right]$$

Essendo la portata d'estrazione totale minore di quella di immissione si sceglie come valore di progetto la portata d'aria esterna (che in pari quantità sarà anche estratta).

$$\text{Portata d'aria esterna totale: } Q = 213,48 \left[\frac{m^3}{h} \right]$$

$$\text{Tasso di ricambio d'aria: } n = 213,48 / 279,7 = 0,76 \text{ h}^{-1}$$

CEN TR 14788

Per poter confrontare i valori di questa normativa con quelli delle precedenti si assume il caso limite di occupazione dell'appartamento tutto il giorno.

Inquinante principale (*key pollutant*) = anidride carbonica CO₂

Affollamento = 4 persone

$$\text{Produzione di CO}_2 \text{ di un adulto durante il sonno: } q = 12 \left[\frac{l}{h} \right]$$

Produzione di CO₂ di un adulto in attività durante il giorno: $q = 18 \left[\frac{l}{h} \right]$

Media ponderata sull'intera giornata della produzione di CO₂ (8h di sonno + 16h di attività): $q = 16 \left[\frac{l}{h} \right]$

Produzione totale di CO₂: $q = 16 \cdot 4 = 64 \left[\frac{l}{h} \right] = 0,018 \left[\frac{l}{s} \right]$

Concentrazione max. inquinante (di equilibrio) aria interna $c_E = 1000 \text{ ppm} = 0,1\%$

Concentrazione inquinante aria esterna $c_e = 350 \text{ ppm} = 0,035\%$

Portata d'aria esterna totale: $Q = \frac{q}{c_E - c_e} = 27,35 \left[\frac{l}{s} \right] = 98,46 \left[\frac{m^3}{h} \right]$

Tasso di ricambio d'aria: $n = 98,46/279,7 = 0,35 \text{ h}^{-1}$

4.2.1.2 Riepilogo dei risultati

Normativa	Portata d'aria esterna totale	Tasso di ricambio d'aria
<i>UNI 10339</i>	158,4 m ³ /h	0,57 h ⁻¹
<i>UNI 10339 rev</i>	93,6 m ³ /h	0,33 h ⁻¹
<i>ASHRAE 62-1</i>	144 m ³ /h	0,51 h ⁻¹
<i>UNI EN 15251</i>	213,48 m ³ /h	0,76 h ⁻¹
<i>CEN TR 14788</i>	98,46 m ³ /h	0,35 h ⁻¹

Tabella 4-2 - Riepilogo delle portate di aria ricavate in base alle normative per l'appartamento 1

Il tasso di ricambio maggiore risulta essere pari a $n = 0,76 \text{ h}^{-1}$ pari ad una portata nominale di aria esterna da immettere $Q = 213,48 \text{ m}^3/\text{h}$

Si verifica ora se il valore del tasso di ricambio massimo è compatibile con la normativa che ci indica la possibilità di formazione di muffe e condense superficiali.

UNI EN ISO 13788:2003

Dati climatici ricavati dalla UNI 10349:1994

Tasso di ricambio d'aria: $n = 0,76 \text{ h}^{-1}$

Affollamento = 4 persone

Produzione di vapore all'interno degli ambienti (da CEN TR 14788) nel caso di 4

$$\text{persone in attività e alta emissione di umidità: } G = 14 \left[\frac{\text{kg}}{\text{giorno}} \right] = 0,583 \left[\frac{\text{kg}}{\text{h}} \right]$$

$$\text{Trasmittanza termica parete esterna: } U = 1,075 \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \right]$$

$$\text{Resistenza termica superficiale interna: } R_{si} = 0,25 \left[\frac{\text{m}^2 \cdot \text{K}}{\text{W}} \right]$$

$$\text{Fattore di temperatura sulla superficie interna: } f_{Rsi} = 1 - R_{si} \cdot U = 0,731$$

Mese	θ_e	p_{ve}	θ_i	n	Δp_{ve}	p_i	$p_{sat}(\theta_{si})$	$\theta_{si,min}$	f_{rsi}
	°C	Pa	°C	h^{-1}	Pa	Pa	Pa	°C	
Gennaio	2,1	636	20	0,76	360	1032	1290	10,7	0,483
Febbraio	4,6	736	20	0,76	361	1134	1417	12,2	0,491
Marzo	9,4	847	20	0,76	365	1248	1560	13,6	0,399
Aprile	14,2	1084	20	0,76	368	1488	1860	16,4	0,374
Maggio	18,2	1418	20	0,76	370	1825	2281	19,6	0,784
Giugno	22,9	1806	20	0,76	373	2216	2770	22,8	0,042
Luglio	25,4	1835	20	0,76	375	2247	2809	23,0	0,443
Agosto	24,9	1904	20	0,76	374	2316	2895	23,5	0,285
Settembre	21,2	1611	20	0,76	372	2020	2525	21,3	-0,048
Ottobre	14,9	1261	20	0,76	368	1666	2082	18,1	0,637
Novembre	8,7	956	20	0,76	364	1356	1696	14,9	0,550
Dicembre	4	700	20	0,76	361	1097	1372	11,7	0,479

Tabella 4-3 - Calcolo mensile secondo UNI EN ISO 13788:2003 per appartamento 1

Con le condizioni assunte in Tabella 4-3, Maggio risulta essere il mese critico con $f_{Rsi,max} = 0,784$. Dall'esame dei due valori non risulta soddisfatta la disequaglianza $f_{Rsi} \geq f_{Rsi,max}$, per cui si procede in maniera iterativa per ricavare il minimo valore di n che rende vera la disequaglianza sopra riportata. Tale valore risulta essere $n = 0,79 \text{ h}^{-1}$ per cui risulta $f_{Rsi,max} = 0,708 \leq 0,731$ (secondo la Tabella 4-4).

Mese	θ_e	p_{ve}	θ_i	n	Δp_{ve}	p_i	$p_{sat}(\theta_{si})$	$\theta_{si,min}$	f_{rsi}
	°C	Pa	°C	h^{-1}	Pa	Pa	Pa	°C	
Gennaio	2,1	636	20	0,79	346	1017	1271	10,5	0,471
Febbraio	4,6	736	20	0,79	348	1119	1398	12,0	0,478
Marzo	9,4	847	20	0,79	351	1233	1541	13,4	0,381
Aprile	14,2	1084	20	0,79	354	1473	1841	16,2	0,346
Maggio	18,2	1418	20	0,79	356	1810	2262	19,5	0,708
Giugno	22,9	1806	20	0,79	359	2201	2751	22,7	0,082
Luglio	25,4	1835	20	0,79	360	2231	2789	22,9	0,465
Agosto	24,9	1904	20	0,79	360	2300	2875	23,4	0,308
Settembre	21,2	1611	20	0,79	358	2005	2506	21,1	0,057
Ottobre	14,9	1261	20	0,79	354	1650	2063	18,0	0,608
Novembre	8,7	956	20	0,79	350	1341	1677	14,7	0,535
Dicembre	4	700	20	0,79	347	1082	1353	11,5	0,466

Tabella 4-4 - Calcolo definitivo secondo UNI EN ISO 13788:2003 per appartamento 1

4.2.2 Appartamento 2

Si riporta in Figura 4-6 la pianta dell'appartamento n°2 e in Tabella 4-5 i dati relativi alle superfici e ai volumi dell'alloggio.



Figura 4-6 - Pianta appartamento 2

	Ambiente	SP (m²)	h (m)	V (m³)
1	<i>Ingresso</i>	3,9	2,8	10,9
2	<i>Soggiorno</i>	19,5	2,8	54,6
3	<i>Pranzo</i>	11	2,8	30,8
4	<i>Disimpegno</i>	5,5	2,8	15,4
5	<i>Cucina</i>	6,8	2,8	19,0
6	<i>Letto singolo</i>	14,5	2,8	40,6
7	<i>Letto matrimoniale</i>	14,5	2,8	40,6
8	<i>Disimpegno</i>	2,2	2,8	6,2
9	<i>Ripostiglio</i>	1,5	2,8	4,2
10	<i>Bagno</i>	7	2,8	19,6
	Totale	86	-	241,9

Tabella 4-5 - Dati relativi all'appartamento 2

Si riportano i risultati in forma tabellare per velocità di esposizione, avendo condotto i calcoli nell'identico modo dell'appartamento 1.

Normativa	Portata d'aria esterna totale	Tasso di ricambio d'aria
<i>UNI 10339</i>	138,6 m ³ /h	0,57 h ⁻¹
<i>UNI 10339 rev</i>	81,1 m ³ /h	0,34 h ⁻¹
<i>ASHRAE 62-1</i>	120 m ³ /h	0,5 h ⁻¹
<i>UNI EN 15251</i>	214,2 m ³ /h	0,89 h ⁻¹
<i>CEN TR 14788</i>	73,85 m ³ /h	0,31 h ⁻¹

Tabella 4-6 - Riepilogo delle portate d'aria ricavate in base alle normative per l'appartamento 2

Il tasso di ricambio maggiore risulta essere pari a $n = 0,89 \text{ h}^{-1}$ pari ad una portata nominale di aria esterna da immettere $Q = 214,2 \text{ m}^3/\text{h}$

UNI EN ISO 13788

Utilizzando il valore sopra riportato risulta soddisfatta la diseuguaglianza $f_{Rsi} \geq f_{Rsi,max}$, per cui il valore di $n = 0,89 \text{ h}^{-1}$ è sufficiente per evitare la formazione di muffe e condense superficiali.

4.2.3 Appartamento 3

Si riporta in Figura 4-7 la pianta dell'appartamento n°2 e in Tabella 4-7 i dati relativi alle superfici e ai volumi dell'alloggio.



Figura 4-7 - Pianta dell'appartamento 3

	Ambiente	SP (m²)	h (m)	V (m³)
1	<i>Ingresso</i>	5,3	2,8	14,8
2	<i>Soggiorno</i>	19,1	2,8	53,5
3	<i>Disimpegno</i>	3,9	2,8	10,9
4	<i>Pranzo</i>	13,1	2,8	36,7
5	<i>Cucina</i>	8,6	2,8	24,1
6	<i>Disimpegno</i>	4,7	2,8	13,2
7	<i>Disimpegno</i>	5,4	2,8	15,1
8	<i>Letto singolo</i>	11	2,8	30,8
9	<i>Letto singolo</i>	13,8	2,8	38,6
10	<i>Letto matrimoniale</i>	13,8	2,8	38,6
11	<i>Bagno</i>	7,3	2,8	20,4
12	<i>Bagno</i>	7	2,8	19,6
	Totale	113	-	316,4

Tabella 4-7 - Dati relativi all'appartamento 3

Si riportano i risultati in forma tabellare per velocità di esposizione, avendo condotto i calcoli nell'identico modo dell'appartamento 1.

Normativa	Portata d'aria esterna totale	Tasso di ricambio d'aria
<i>UNI 10339</i>	179 m ³ /h	0,57 h ⁻¹
<i>UNI 10339 rev</i>	105,6 m ³ /h	0,33 h ⁻¹
<i>ASHRAE 62-1</i>	158 m ³ /h	0,5 h ⁻¹
<i>UNI EN 15251</i>	255 m ³ /h	0,81 h ⁻¹
<i>CEN TR 14788</i>	98,5 m ³ /h	0,31 h ⁻¹

Tabella 4-8 - Riepilogo delle portate di aria ricavate in base alle normative per l'appartamento 3

Il tasso di ricambio maggiore risulta essere pari a $n = 0,81 \text{ h}^{-1}$ pari ad una portata nominale di aria esterna da immettere $Q = 255 \text{ m}^3/\text{h}$

UNI EN ISO 13788

Utilizzando il valore sopra riportato risulta soddisfatta la disequaglianza $f_{Rsi} \geq f_{Rsi,max}$, per cui il valore di $n = 0,81 \text{ h}^{-1}$ è sufficiente per evitare la formazione di muffe e condense superficiali.

4.2.4 Appartamento 4

Si riporta in Figura 4-8 la pianta dell'appartamento n°2 e in Tabella 4-9 i dati relativi alle superfici e ai volumi dell'alloggio.

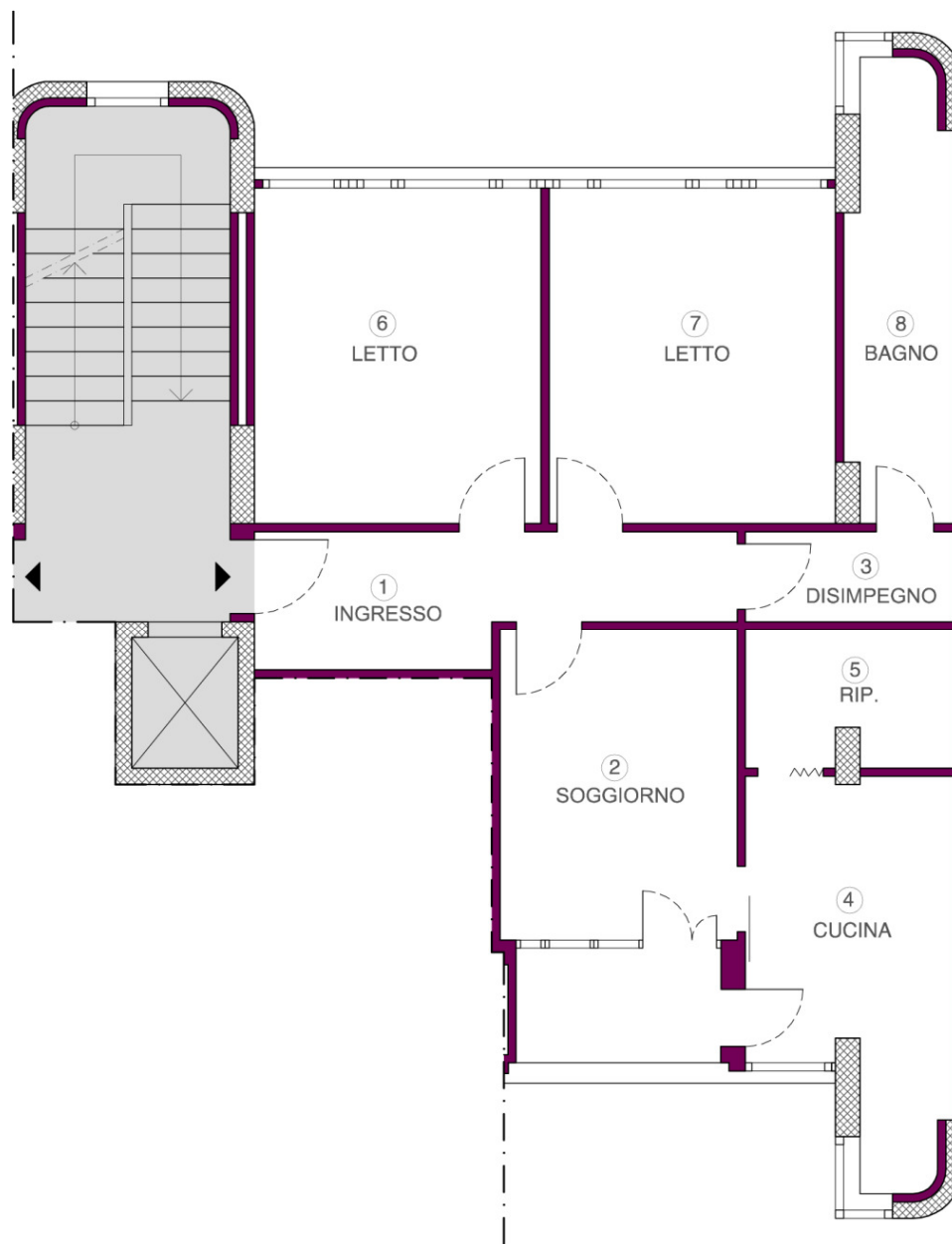


Figura 4-8 - Pianta dell'appartamento 4

Ambiente		SP (m²)	h (m)	V (m³)
1	<i>Ingresso</i>	8,2	2,8	23,0
2	<i>Soggiorno</i>	11	2,8	30,8
3	<i>Disimpegno</i>	2,8	2,8	7,8
4	<i>Cucina</i>	10,5	2,8	29,4
5	<i>Ripostiglio</i>	4,2	2,8	11,8
6	<i>Letto singolo</i>	14,5	2,8	40,6
7	<i>Letto matrimoniale</i>	14,5	2,8	40,6
8	<i>Bagno</i>	7	2,8	19,6
Totale		73	-	203,6

Tabella 4-9 - Dati relativi all'appartamento 4

Si riportano i risultati in forma tabellare per velocità di esposizione, avendo condotto i calcoli nell'identico modo dell'appartamento 1.

Normativa	Portata d'aria esterna totale	Tasso di ricambio d'aria
<i>UNI 10339</i>	120 m ³ /h	0,58 h ⁻¹
<i>UNI 10339 rev</i>	69,2 m ³ /h	0,34 h ⁻¹
<i>ASHRAE 62-1</i>	105,8 m ³ /h	0,52 h ⁻¹
<i>UNI EN 15251</i>	144 m ³ /h	0,71 h ⁻¹
<i>CEN TR 14788</i>	72 m ³ /h	0,35 h ⁻¹

Tabella 4-10 - Riepilogo delle portate di aria ricavate in base alle normative per l'appartamento 4

Il tasso di ricambio maggiore risulta essere pari a $n = 0,71 \text{ h}^{-1}$ pari ad una portata nominale di aria esterna da immettere $Q = 144 \text{ m}^3/\text{h}$

UNI EN ISO 13788

Utilizzando il valore sopra riportato non risulta soddisfatta la disequaglianza $f_{Rsi} \geq f_{Rsi,max}$, in quanto, come visibile in Tabella 4-11, $f_{Rsi,max} = 1,683$ per cui si procede in maniera iterativa per ricavare il minimo valore di n che rende vera la disequaglianza sopra riportata. Tale valore risulta essere $n = 1,08 \text{ h}^{-1}$ (Tabella 4-12) per cui risulta $f_{Rsi,max} = 0,718 \leq 0,726$ a cui corrisponde una portata di aria esterna pari a $220 \text{ m}^3/\text{h}$.

Mese	θ_e °C	p_{ve} Pa	θ_i °C	n h^{-1}	Δp_{ve} Pa	p_i Pa	$p_{sat}(\theta_{si})$ Pa	$\theta_{si,min}$ °C	f_{rsi}
Gennaio	2,1	636	20	0,71	529	1218	1523	13,3	0,624
Febbraio	4,6	736	20	0,71	532	1321	1651	14,5	0,643
Marzo	9,4	847	20	0,71	536	1437	1796	15,8	0,605
Aprile	14,2	1084	20	0,71	541	1679	2098	18,3	0,702
Maggio	18,2	1418	20	0,71	544	2017	2521	21,2	1,683
Giugno	22,9	1806	20	0,71	549	2410	3012	24,2	-0,436
Luglio	25,4	1835	20	0,71	551	2441	3051	24,4	0,188
Agosto	24,9	1904	20	0,71	551	2510	3137	24,8	0,011
Settembre	21,2	1611	20	0,71	547	2213	2766	22,8	-1,293
Ottobre	14,9	1261	20	0,71	541	1856	2320	19,9	0,977
Novembre	8,7	956	20	0,71	535	1545	1931	17,0	0,731
Dicembre	4	700	20	0,71	531	1284	1605	14,1	0,629

Tabella 4-11 - Calcolo mensile secondo UNI EN ISO 13788:2003 per appartamento 4

Mese	θ_e °C	p_{ve} Pa	θ_i °C	n h^{-1}	Δp_{ve} Pa	p_i Pa	$p_{sat}(\theta_{si})$ Pa	$\theta_{si,min}$ °C	f_{rsi}
Gennaio	2,1	636	20	1,08	348	1019	1273	10,6	0,472
Febbraio	4,6	736	20	1,08	349	1120	1401	12,0	0,480
Marzo	9,4	847	20	1,08	352	1235	1543	13,5	0,384
Aprile	14,2	1084	20	1,08	355	1475	1844	16,2	0,349
Maggio	18,2	1418	20	1,08	358	1812	2264	19,5	0,718
Giugno	22,9	1806	20	1,08	361	2203	2753	22,7	0,077
Luglio	25,4	1835	20	1,08	362	2233	2792	22,9	0,462
Agosto	24,9	1904	20	1,08	362	2302	2878	23,4	0,305
Settembre	21,2	1611	20	1,08	360	2007	2508	21,1	0,043
Ottobre	14,9	1261	20	1,08	356	1652	2065	18,0	0,612
Novembre	8,7	956	20	1,08	352	1343	1679	14,8	0,537
Dicembre	4	700	20	1,08	349	1084	1355	11,5	0,468

Tabella 4-12 - Calcolo definitivo secondo UNI EN ISO 13788:2003 per appartamento 4

4.3 Calcolo delle portate d'aria per infiltrazione

In questa trattazione vengono trascurate le infiltrazioni attraverso l'involucro in quanto non sono disponibili dati di rilevazione: si considerano quindi solamente le infiltrazioni attraverso i serramenti. La norma di riferimento è la UNI EN 12207 (descritta nel capitolo III) che prevede la definizione di 4 classi in ordine decrescente di permeabilità.

I serramenti dell'edificio in questione, non avendo a disposizione dati precisi, possono collocarsi tra la classe 2 e la classe 3, per una superficie apribile totale pari a 5 m²; sono collocati sulla parete sopravento (SW) in direzione della quale spirano i venti prevalenti della città di Bologna con una velocità media annua pari a 1,6 m/s. (valore tratto dalla norma UNI 10349 che definisce i dati climatici principali per alcune località italiane)

Dall'equazione di Bernoulli è possibile ricavare il valore della pressione su una superficie conoscendo la velocità del vento:

$$p = \frac{1}{2} \rho v^2 \quad \left[\frac{N}{m^2} \right]$$

dove:

$$\rho = \text{densità dell'aria} = 1,225 \text{ Kg/m}^3$$

La Figura 4-9 presenta un limite inferiore alla pressione agente sugli infissi pari a 10 Pa (4 m/s ventosità moderata): si utilizza questo valore per i calcoli i cui risultati vengono riportati in Tabella 4-13.

Legenda
 X Pressione in Pa
 Y $m^3/h m^2$ dell'area totale
 Z $m^3/h m$ di apertura giunti

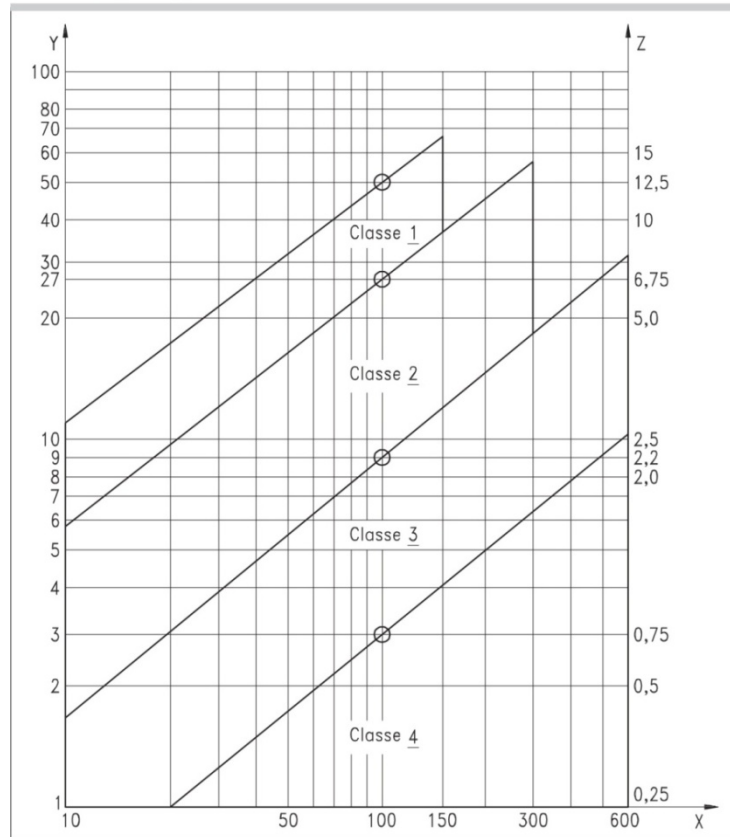


Figura 4-9 - Classificazione e portate d'aria di infiltrazione (da UNI EN 12207:2000)

		Portate d'aria per infiltrazione (m^3/h)	
		classe 2	classe 3
velocità vento	4 m/s	30	8,5
pressione	10 Pa		
Ricambi orari n (h^{-1})	App. 1	0,11	0,03
	App. 2	0,12	0,04
	App. 3	0,09	0,03
	App. 4	0,15	0,04

Tabella 4-13 - Portate d'aria per infiltrazione per ogni appartamento

I valori ottenuti mostrano che le portate d'aria per infiltrazione non sono sufficienti a garantire un adeguato ricambio dell'aria a serramenti chiusi, attestandosi a valori di ricambi massimi intorno a $0,1 h^{-1}$.

4.4 Calcolo delle portate d'aria dovute all'aerazione

A causa delle ipotesi semplificative alla base del calcolo delle portate dovute ad una ventilazione trasversale (*cross-side ventilation*) come l'assenza di partizioni interne (aspetto fondamentale in questo tipo di alloggi) si ritiene più opportuno effettuare una valutazione delle portate in gioco considerando l'apertura dei serramenti su un unico lato (*single-side ventilation*). La metodologia utilizzata è quella descritta all'interno della norma UNI EN 15424:2008, la cui descrizione è riportata nel capitolo III.

Si riporta la formula relativa al calcolo in questione:

$$q_{v,airing} = 3,6 \cdot 500 A_{ow} V^{0,5} \quad \left[\frac{m^3}{h} \right]$$

Dove il parametro V è dato da:

$$V = C_t + C_w \cdot v_{met}^2 + C_{st} \cdot H_{window} \cdot |\theta_i - \theta_e|$$

4.4.1 Appartamento 1

Si svolgono i calcoli per intero per un solo ambiente, il soggiorno, riportando in forma tabellare i rimanenti, per una lettura più scorrevole.

Area apribile della finestra: $A_{ow} = 4,3 \text{ m}^2$

Coefficiente di turbolenza del vento: $C_t = 0,01$

Coefficiente di velocità del vento: $C_w = 0,001$

Coefficiente per effetto tiraggio: $C_{st} = 0,0035$

Altezza libera della finestra: $H_{window} = 1,45 \text{ m}$

Velocità del vento: $v_{met} = 1,6 \text{ m/s}$ (media annuale)

Temperatura aria interna: $\theta_i = 20 \text{ }^\circ\text{C}$

Temperatura aria esterna media: $\theta_e = 7 \text{ }^\circ\text{C}$ (mediata sull'intero periodo di riscaldamento)

Tempo di apertura medio finestra: $t = 10 \text{ min}$ (5 minuti a mezzogiorno, 5 minuti alla sera)

$$\text{Parametro } V = 0,01 + 0,001 \cdot (1,6^2) + 0,0035 \cdot 1,45 \cdot |20 - 7| = 0,08$$

$$\text{Flusso d'aria entrante: } q_{v,airing} = 3,6 \cdot 500 \cdot 4,3 \cdot 0,08^{0,5} = 2169 \left[\frac{m^3}{h} \right]$$

$$\text{Flusso d'aria entrante in una giornata: } (2169 / 60) \cdot 10 = 361,5 \left[m^3 \right]$$

	Ambiente	A _{ow} (m ²)	H _{window} (m)	V	q _{v,airing} (m ³ /h)	t (min)	portata (m ³)
2	Soggiorno	4,3	1,45	0,08	2169	10	361,5
4	Cucina	1,6	1,45	0,08	807	10	134,5
5	Letto singolo	4	1,45	0,08	2018	10	336,3
6	Letto singolo	2,15	1	0,06	933	10	155,5
7	Letto matrimoniale	2,15	1	0,06	933	10	155,5
9	Bagno	1,2	1,45	0,08	605	5	50,4
10	Bagno	1,2	1,45	0,08	605	5	50,4
TOT							1244,2

portata oraria (m³/h)	51,8
tasso di ricambio n (h⁻¹)	0,19

Tabella 4-14 - Portate d'aria totali per aerazione su un unico lato per appartamento 1

4.4.2 Appartamento 2

Si riportano i risultati in forma tabellare

	Ambiente	A _{ow} (m ²)	H _{window} (m)	V	q _{v,airing} (m ³ /h)	t (min)	portata (m ³)
2	Soggiorno	4,3	1,45	0,08	2169	10	361,5
3	Pranzo	4	1,45	0,08	2018	10	336,3
5	Cucina	1,2	1,45	0,08	605	10	100,9
6	Letto singolo	2,15	1	0,06	933	10	155,4
7	Letto matrimoniale	2,15	1	0,06	933	10	155,4
10	Bagno	1,2	1,45	0,08	605	5	50,4
TOT							1160,0

portata oraria (m³/h)	48,3
tasso di ricambio n (h⁻¹)	0,20

Tabella 4-15 - Portate d'aria totali per aerazione su un unico lato per appartamento 2

4.4.3 Appartamento 3

Si riportano i risultati in forma tabellare

	Ambiente	A_{ow} (m²)	H_{window} (m)	V	q_{v,airing} (m³/h)	t (min)	portata (m³)
2	<i>Soggiorno</i>	4,3	1,45	0,08	2169	10	361,5
4	<i>Pranzo</i>	3	1,45	0,08	1513	10	252,2
5	<i>Cucina</i>	1,6	1,45	0,08	807	10	134,5
8	<i>Letto singolo</i>	4	1,45	0,08	2018	10	336,3
9	<i>Letto singolo</i>	2,15	1	0,06	933	10	155,4
10	<i>Letto matrimoniale</i>	2,15	1	0,06	933	10	155,4
11	<i>Bagno</i>	1,2	1,45	0,08	605	5	50,4
12	<i>Bagno</i>	1,2	1,45	0,08	605	5	50,4
TOT							1496,3

portata oraria (m³/h)	62,3
tasso di ricambio n (h⁻¹)	0,20

Tabella 4-16 - Portate d'aria totali per aerazione su un unico lato per appartamento 3

4.4.4 Appartamento 4

Si riportano i risultati in forma tabellare

	Ambiente	A_{ow} (m²)	H_{window} (m)	V	q_{v,airing} (m³/h)	t (min)	portata (m³)
2	<i>Soggiorno</i>	4	1,45	0,08	2018	10	336,3
4	<i>Cucina</i>	2,5	1,45	0,08	1261	10	210,2
6	<i>Letto singolo</i>	2,15	1	0,06	933	10	155,4
7	<i>Letto matrimoniale</i>	2,15	1	0,06	933	10	155,4
8	<i>Bagno</i>	1,2	1,45	0,08	605	5	50,4
TOT							907,7

portata oraria (m³/h)	37,8
tasso di ricambio n (h⁻¹)	0,19

Tabella 4-17 - Portate d'aria totali per aerazione su un unico lato per appartamento 4

4.4.5 Riepilogo risultati

Si riportano in Tabella 4-18 i valori di aerazione e infiltrazione per ciascun appartamento. Come si può notare, in assenza di sistema di ventilazione e con una apertura delle finestre controllata, il tasso di ricambio degli interi appartamenti si aggira intorno a 0,3 h⁻¹.

	Tasso di ricambio orario n (h^{-1})		
	Infiltrazione	Aerazione	TOTALE
Appartamento 1	0,11	0,19	0,3
Appartamento 2	0,12	0,2	0,32
Appartamento 3	0,09	0,2	0,29
Appartamento 4	0,15	0,19	0,34

Tabella 4-18 - Riepilogo risultati di infiltrazione e aerazione per ogni appartamento

4.5 Calcolo delle portate d'aria per i singoli ambienti

Si procede ora alla ripartizione in base ai volumi della portata d'aria totale per gli ambienti nei quali è prevista l'immissione di aria pulita ai fini della progettazione dell'impianto di ventilazione: soggiorni, pranzo e camere da letto.

Per brevità si considera solamente l'appartamento 1.

Appartamento 1

Portata d'aria totale: $Q = 220,98 \text{ m}^3/\text{h}$ ($n = 0,79 \text{ h}^{-1}$)

Volume degli ambienti totale = $55,4 + 29,4 + 40,6 + 40,6 = 166 \text{ m}^3$

Si riportano i risultati in Tabella 4-19:

	Ambiente	V (m^3)	coefficiente di ripartizione	Q (m^3/h)
2	<i>Soggiorno</i>	55,4	0,334	73,75
5	<i>Letto singolo</i>	29,4	0,177	39,14
6	<i>Letto singolo</i>	40,6	0,245	54,05
7	<i>Letto matrimoniale</i>	40,6	0,245	54,05
	<i>Totale</i>	166	1	220,98

Tabella 4-19 - Ripartizione della portata d'aria totale tra i vari ambienti in base ai volumi

Risulta interessante andare a verificare questi valori con quelli ricavati in base alla norma CEN TR 14788 per particolari profili di occupazione.

Vengono qui riportati i calcoli relativi al primo ambiente considerato, esponendo i rimanenti in forma tabellare per una più veloce comprensione.

SOGGIORNO

Volume: 55,4 m³

Numero di occupanti: 2 e 3

Occupazione t₁: 2h, 6h

Produzione di CO₂ per adulto in attività: 18 l/h

Concentrazione di CO₂ tollerabile = 1000 ppm = 0,1%

Concentrazione di CO₂ esterna = 340 ppm = 0,034%

Tempo di ritorno t₂ = 24 h

Aria proveniente dall'esterno

Occupazione: 2 persone per 2 h

Produzione totale di CO₂ = 18 · 2 = 36 l/h = 0,01 l/s

Portata d'aria per diluizione = $\frac{0,01}{0,1\% - 0,034\%} = 15,15 \text{ l/s} = 54,55 \text{ m}^3/\text{h}$

Trattandosi di inquinante rilasciato a tempo intermittente con tempo di ritorno t₂, si procede alla riduzione di questa portata secondo le indicazioni della norma.

$\frac{Q \cdot t_1}{V} = 1,97$ a cui corrisponde (sulla curva $r = \frac{24h}{2h} = 2$) nel grafico di Figura 4-10 un

valore di $\frac{Q^r}{Q} = 0,79$ per cui la portata corretta risulta $Q^r = 43,1 \text{ m}^3/\text{h}$

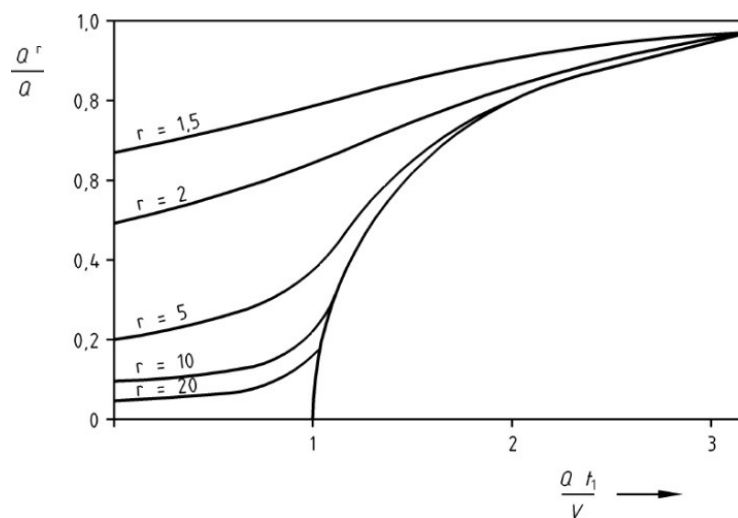


Figura 4-10 - Riduzione del tasso minimo ammissibile quando la sorgente inquinante è intermittente, continua per un periodo di tempo t₁, con un periodo di ritorno t₂ (r = t₂/t₁)
(da CEN TR 14788:2006)

In Tabella 4-20 si riportano i risultati per gli altri ambienti. E' interessante confrontare dal punto di vista pratico i risultati di questa tabella con quelli riportati in Tabella 4-19: trattandosi i primi di valori essenzialmente superiori ai secondi c'è la possibilità di realizzare, anche in un impianto a portata costante, una variazione delle portate tramite serrande per governare l'afflusso di aria immessa in base alla reale occupazione dello spazio.

Ambiente	V (m ³)	Occupazione (h)	n° di persone	prod. CO ² (l/h)	r	Q (m ³ /h)	Q*t1/V	Q ^r /Q	Q ^r (m ³ /h)
2) Soggiorno	55,4	2	2	36	12	54,55	1,97	0,79	43,09
			3	54		81,82	2,95	0,94	76,91
		6	2	36	4	54,55	5,91	1	54,55
			3	54		81,82	8,86	1	81,82
5) Letto singolo	29,4	6	1	12	4	18,18	3,71	1	18,18
		8			3	18,18	4,95	1	18,18
		10			2,4	18,18	6,18	1	18,18
6) Letto singolo	40,6	6	1	12	4	18,18	2,69	0,92	16,73
		8			3	18,18	3,58	1	18,18
		10			2,4	18,18	4,48	1	18,18
7) Letto matrimoniale	40,6	6	2	24	4	36,36	5,37	1	36,36
		8			3	36,36	7,17	1	36,36
		10			2,4	36,36	8,96	1	36,36

Tabella 4-20 - Portate di aria in base a diversi profili di occupazione per i vari ambienti

Le portate di aria ricavate devono ora essere corrette tenendo conto dell'efficienza di ventilazione ϵ_v : supponendo che l'aria venga immessa in ambiente a 18°C e che quella estratta sia a 20° C, la differenza tra le temperature dell'aria estratta e immessa risulta essere pari a -2. Secondo la Tabella 3-1, tratta dalla CR 1752, l'efficienza, ipotizzando una ventilazione a miscelazione con ingresso dell'aria dall'alto ed estrazione dal basso, varia da 0,9 a 1. A favore di sicurezza si sceglie $\epsilon_v = 0,9$.

4.6 Dimensionamento di massima dell'impianto di ventilazione

Ricavate le portate d'aria per i singoli ambienti è possibile effettuare un dimensionamento di massima dell'impianto di ventilazione meccanica. Come riferimento si è scelto di operare su un appartamento tipo, precedentemente identificato come appartamento 1, di cui in Figura 4-11 si riporta la pianta.



Figura 4-11 - Pianta dell'appartamento 1 di riferimento

4.6.1 Rete di immissione e estrazione

In Figura 4-12 è riportato lo schema unifilare dell'impianto: in tratto continuo è rappresentata la rete di immissione, con una linea tratteggiata invece quella di estrazione. In Tabella 4-21 sono riportate invece i risultati dei calcoli e le dimensioni dei canali, ottenute attraverso un dimensionamento di massima con la formula

$$A = \frac{Q}{v} \quad \text{con } Q = \text{portata d'aria} \quad \text{e} \quad v = \text{velocità dell'aria nel condotto}$$

mantenendo le velocità entro limiti utilizzati solitamente nella progettazione di impianti aeraulici per evitare problemi rumorosità.

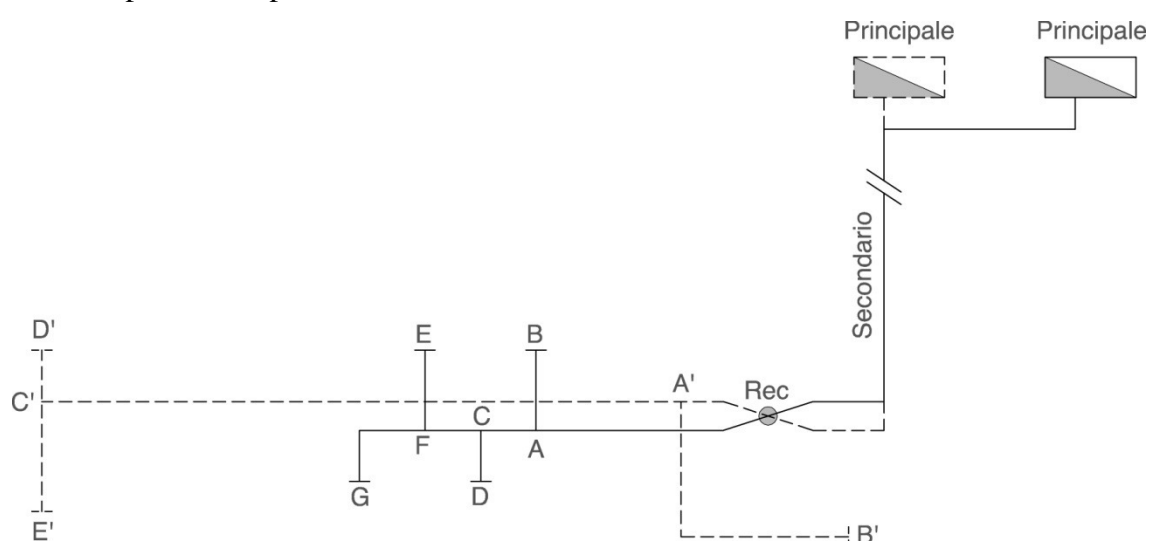


Figura 4-12 - Schema unifilare dell'impianto di VMC per l'appartamento 1

	Ramo	Portata (m ³ /h)	Velocità (m/s)	Dimensione (mm)
	Principale	4000	3,5	400 x 900
	Secondario	250	3	150 x 200
Immissione	Rec - A	250	2,5	Ø 200
	A - B (letto - 7)	60	2	200 x 60
	A - C	190	2	Ø 200
	C - D (soggiorno - 2)	85	2	200 x 60
	C - F	105	2	Ø 200
	F - E (letto - 6)	60	2	200 x 60
	F - G (letto - 5)	45	2	200 x 60
Estrazione	Rec - A'	250	2,5	Ø 200
	A' - B' (cucina - 4)	120	2,5	200 x 60
	A' - C'	130	2	200 x 60
	C' - D' (bagno - 10)	60	2	200 x 60
	C' - E' (bagno - 9)	70	2	200 x 60

Tabella 4-21 - Dimensionamento dei canali

4.6.2 Componenti del sistema di ventilazione

4.6.2.1 Ventilatori

Si è scelto di utilizzare per la movimentazione dell'aria i ventilatori VIK microwatt 5000 dell'azienda Aldes, di cui si riporta una breve descrizione.



Figura 4-13 - Ventilatore VIK microwatt 5000 (Fonte: Aldes)

Si tratta di un cassone in lamiera liscia a basso consumo di energia con motore asincrono ad alimentazione monofase 230 V – 50/60 Hz con trasmissione a cinghie e pulegge montato su supporti antivibranti.

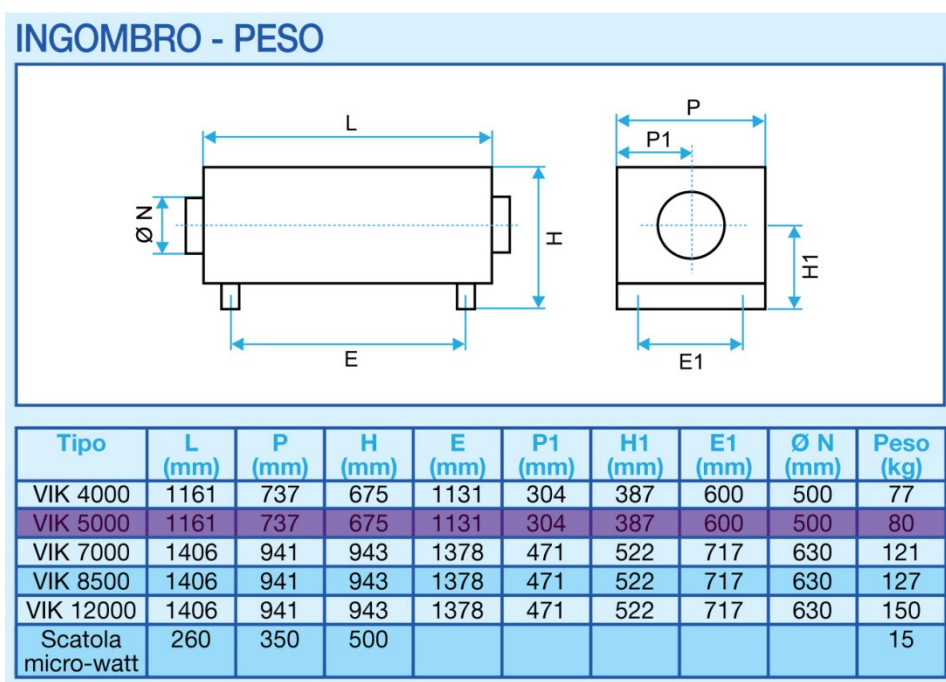


Figura 4-14 - Dimensioni del cassone di ventilazione (Fonte: Aldes)

Si riportano in Figura 4-15 le curve caratteristiche aerauliche e acustiche.

Le curve aerauliche seguenti sono state definite secondo la norma EN ISO 5801.

○: L_p (dB(A)) = livello di pressione acustica misurata a 4 metri dal cassone, con espulsione collegata.

□: L_w (dB(A)) = livello di potenza acustica irradiata lungo il canale, in espulsione.

P (Pa) = pressione statica - P (W) = potenza assorbita.

VIK 5000 micro-watt

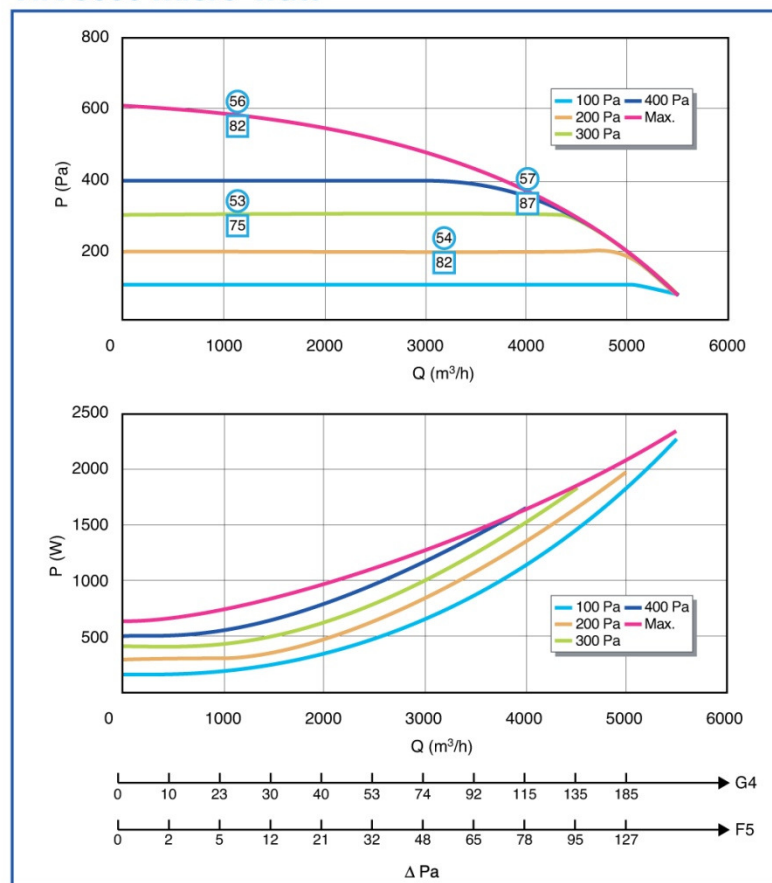


Figura 4-15 - Curve caratteristiche aerauliche e acustiche (Fonte: Aldes)

4.6.2.2 Recuperatore di calore

Per la tipologia di impianto utilizzata si adotta il recuperatore di calore IRSAIR 350 HOR, prodotto dall'azienda IRSAP. Si tratta di uno scambiatore controcorrente in polipropilene ad altissima efficienza di dimensioni estremamente compatte (Figura 4-16) per l'installazione orizzontale in controsoffitto tecnico compreso di una sezione di by-pass ad azionamento manuale.

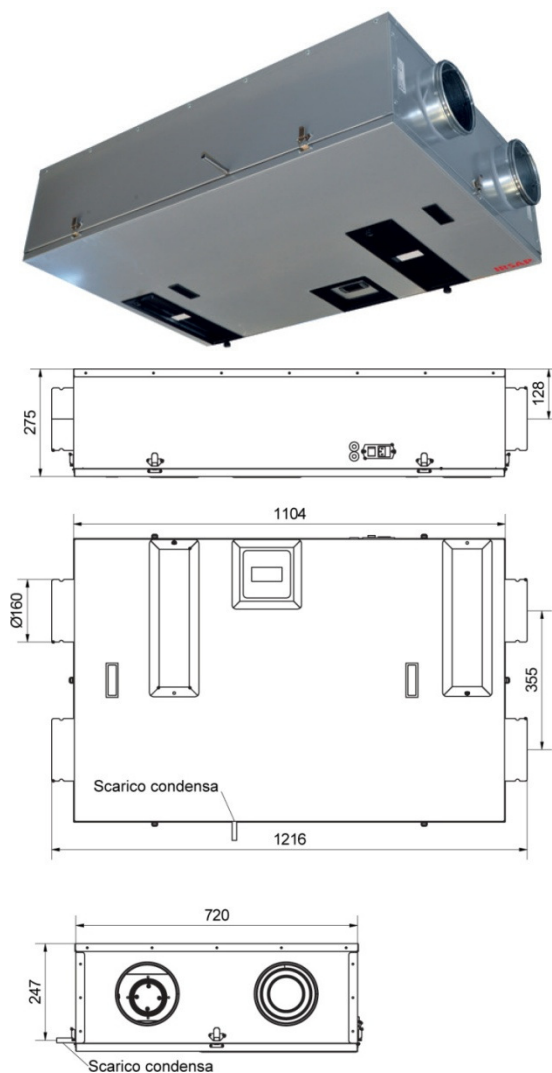


Figura 4-16 - Recuperatore di calore statico IRSAIR 350 HOR (Fonte: Irsap)

In Figura 4-17 sono riportate le caratteristiche aerauliche e l'efficienza del recuperatore in funzione della portata d'aria, calcolata con condizioni termoigrometriche interne di 20 °C e 50% UR ed esterne -5 °C e 80% UR. Il valore di efficienza che si ottiene in corrispondenza della portata totale di un singolo alloggio (circa 250 m³/h) è pari a circa 93%. Tale valore deve essere corretto tenendo conto della variabilità della temperatura esterna durante l'anno: si è scelto quindi di utilizzare un valore di efficienza media nel periodo di riscaldamento costante e pari a 90%.

Curve Aerauliche 350 HOR

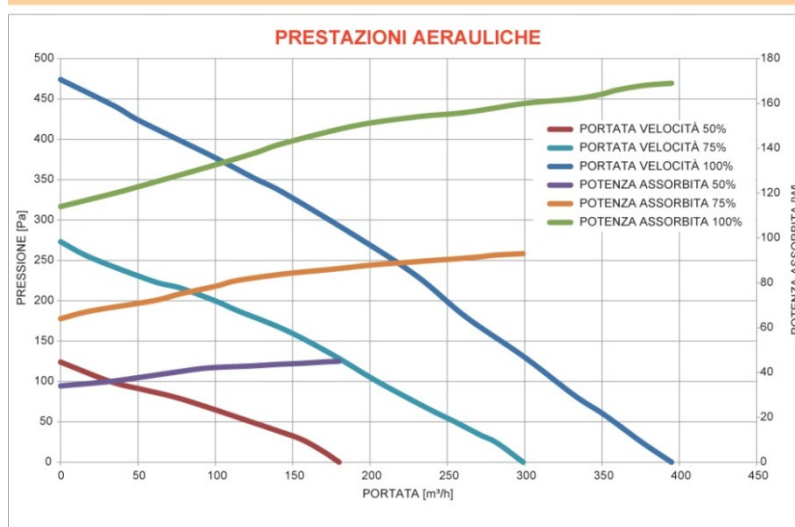


Grafico efficienza 350 HOR

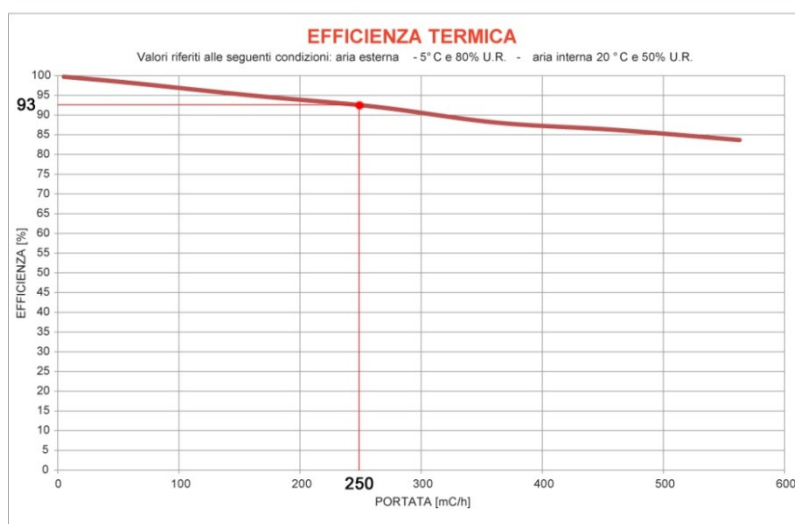


Figura 4-17 - Rendimento termico ed efficienza di recupero (Fonte: Irsap)

4.6.2.3 Condotti aeraulici

Per l'impianto di ventilazione progettato si utilizzano canali in lamiera zincata a sezione rettangolare per il ramo principale della rete e per gli stacchi ad ogni piano; all'interno degli appartamenti si utilizzano quando possibile condotti circolari da cui si staccano canali a sezione schiacciata ovale. Per una descrizione generica dei condotti di ventilazione si rimanda al paragrafo 3.4.1. e al paragrafo 4.6.1 per la dimensione calcolata degli stessi ricavata in fase di progetto.

4.7 Ipotesi di riqualificazione architettonica del sistema edificio-impianto

La realizzazione dell'impianto di VMC visto nel paragrafo precedente richiede uno studio a livello architettonico degli elementi costruttivi utilizzati. In questo paragrafo si vuole, senza entrare in una progettazione di dettaglio, definire una serie di ipotesi di intervento possibili sull'edificio in questione.

4.7.1 Struttura e involucro del cavedio tecnico

La struttura dei cavedi potrà essere realizzata a telaio con profili estrusi di alluminio, garantendo leggerezza, flessibilità e velocità di assemblaggio in cantiere; nei profili è realizzata una scanalatura a T su tutti i lati che consente l'esecuzione di svariati collegamenti mediante connettori a T, ottenendo in questo modo giunti a secco di grande precisione (Figura 4-18). Nel rispetto delle prescrizioni sui giunti sismici ($h/100$), la struttura è posizionata a 30 cm dall'edificio, essendo alto quest'ultimo circa 30 m.

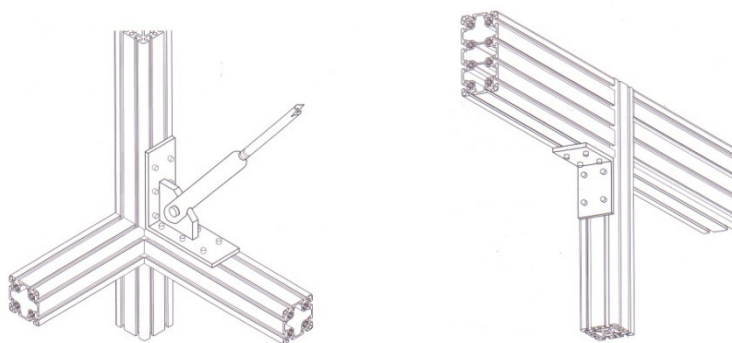


Figura 4-18 – Sistemi di connessione della struttura di alluminio (Fonte: Kieran Timberlake)

La struttura è predisposta per accogliere al suo interno, oltre ai canali principali per la ventilazione, le eventuali unità motocondensanti esterne per l'integrazione della ventilazione con un raffrescamento estivo e un ulteriore cavedio per gli altri impianti tecnici. Il fine ultimo di questa struttura esterna è quindi quello di andare a ospitare in un futuro tutta l'impiantistica a servizio dell'edificio: tubazioni idriche e per il riscaldamento, cavi elettrici e connessioni a fibra ottica, integrandosi pienamente con

l'edificio esistente. Dal punto di vista architettonico per l'involucro della struttura esistono un'infinità di soluzioni: privilegiando l'aspetto della leggerezza e dell'efficienza energetica possono essere utilizzati materiali classici come ad esempio listelli di legno oppure lamiere forate, stirate, pannelli traslucidi fino ai materiali più innovativi come i cuscini di EFTE che integrati con una apposita illuminazione possono generare piacevoli effetti visivi. Il tutto può allo stesso modo essere declinato con una scelta altrettanto vasta di cromie. Nelle ipotesi successive, alcune di queste prevedono la realizzazione della struttura sul fronte Sud, per cui tali soluzioni possono presentare l'integrazione di pannelli fotovoltaici e solari (Figura 4-19).

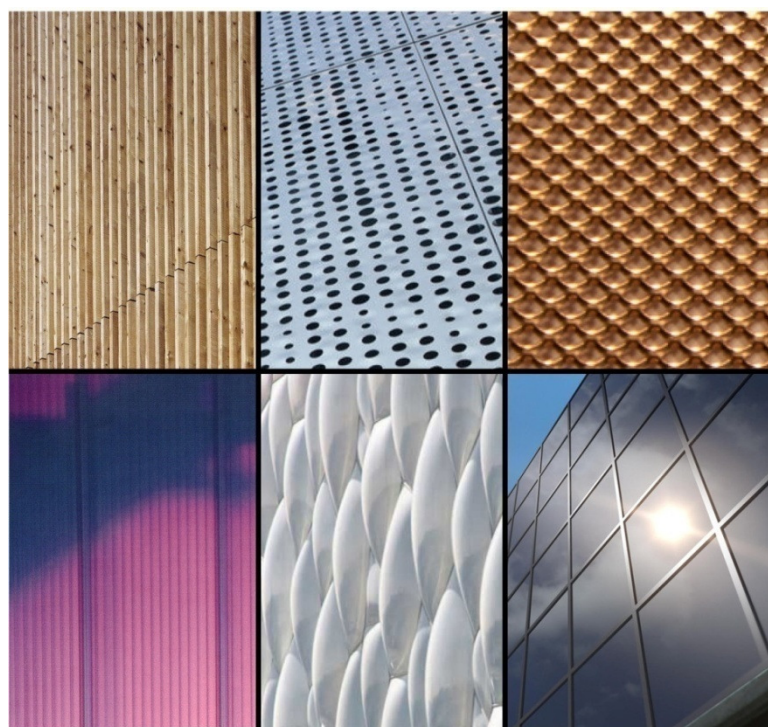
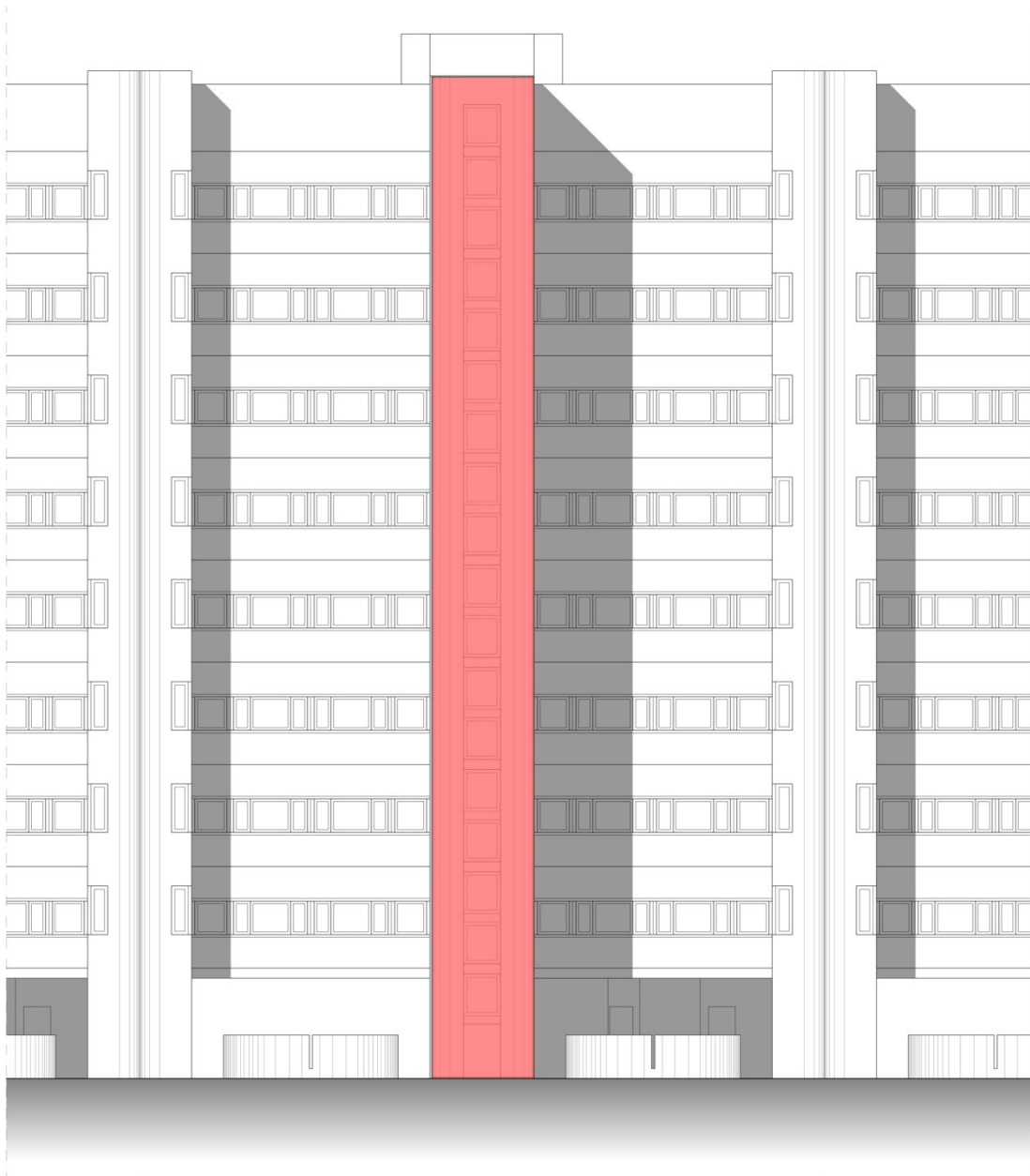


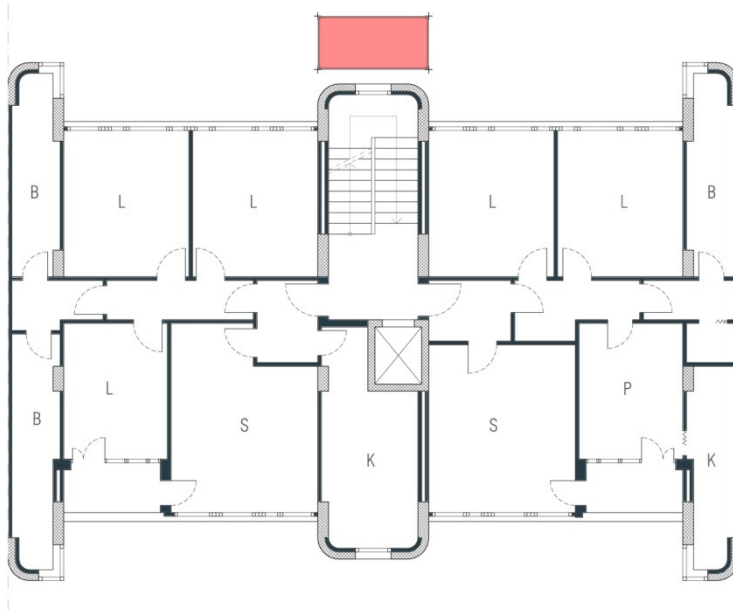
Figura 4-19 – Materiali e cromie per il progetto architettonico

4.7.2 Ipotesi compositive ed impiantistiche

Tra le otto soluzioni proposte nel seguito (pianche e prospetti) alcune prevedono l'integrazione della struttura tecnica con eventuali aggiunte volumetriche, balconi e terrazze che possono essere trasformate in superfici utili per gli alloggi (extra-rooms); altre invece realizzano più di un cavedio tecnico, separando di fatto i condotti dal resto degli impianti. Sono riportate poi le due soluzioni principali di distribuzione interna degli impianti e la Tabella 4-22 che individua vantaggi e svantaggi per ogni soluzione.



Prospetto

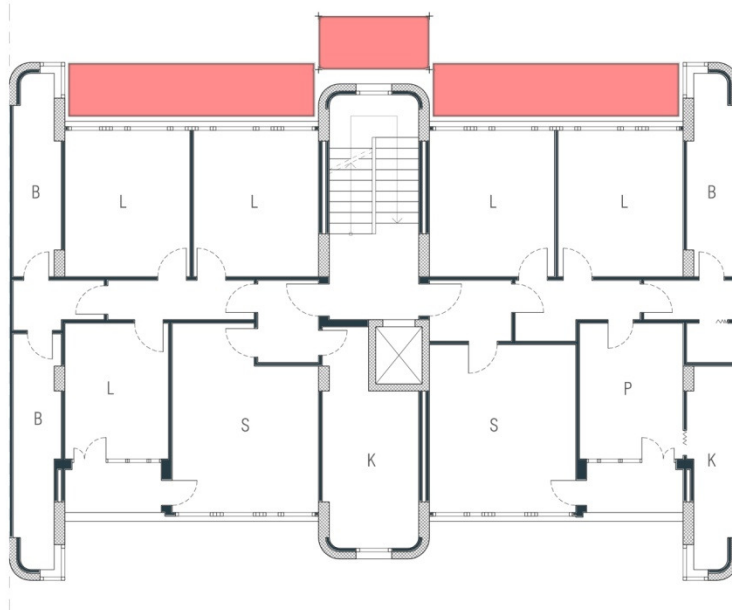


Pianta

scala 1:100



Prospetto



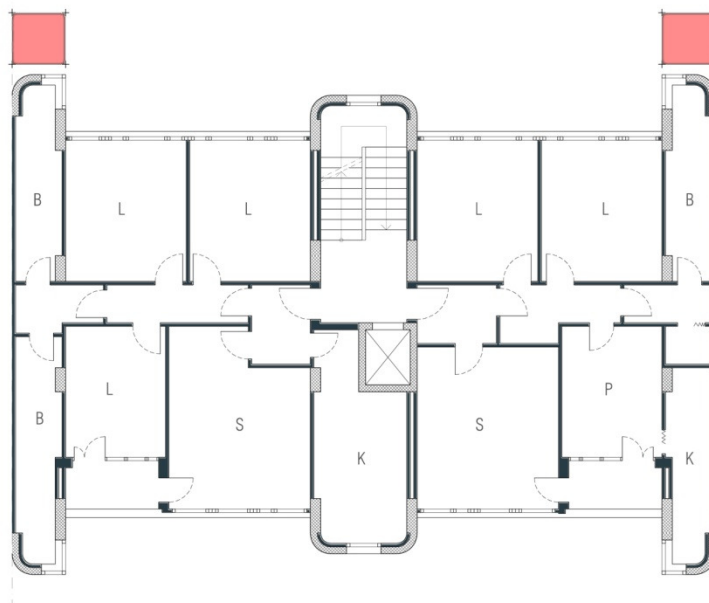
scala 1:100

Pianta





Prospetto

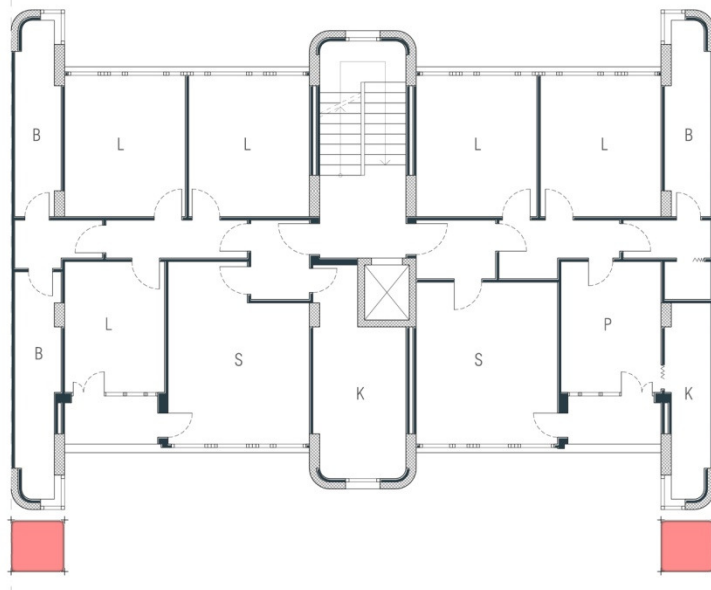


scala 1:100

Pianta



Prospetto



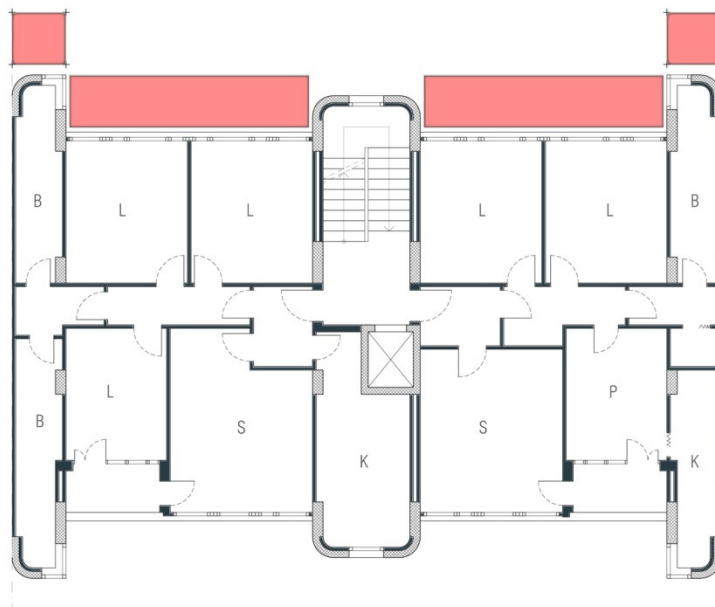
Pianta

scala 1:100





Prospetto



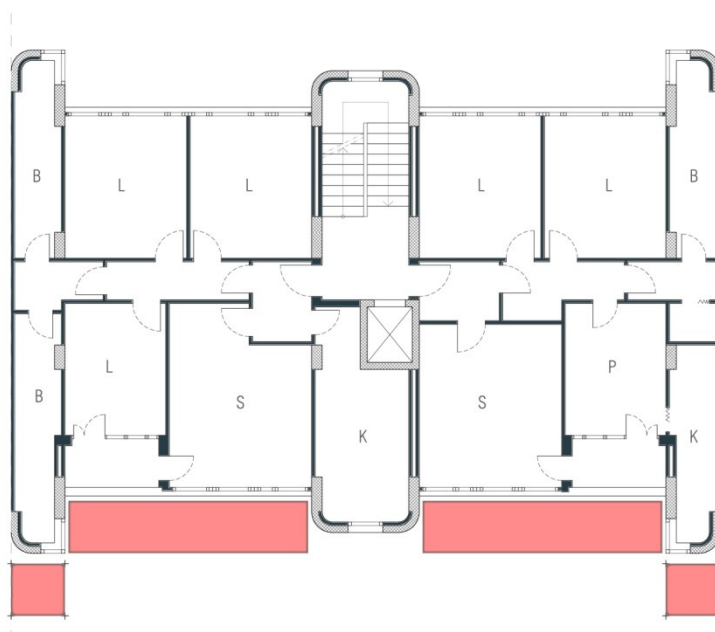
Pianta



scala 1:100

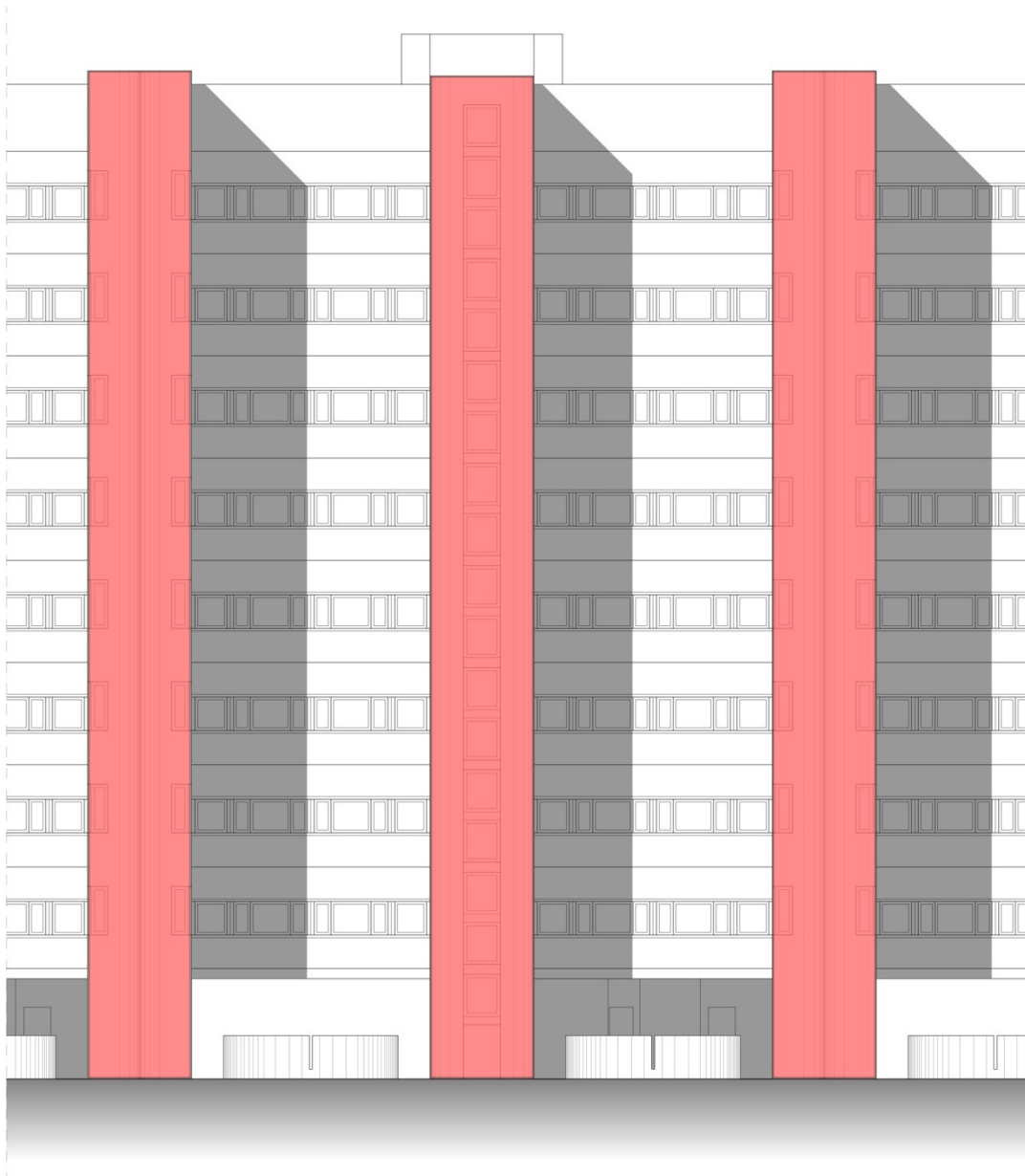


Prospetto

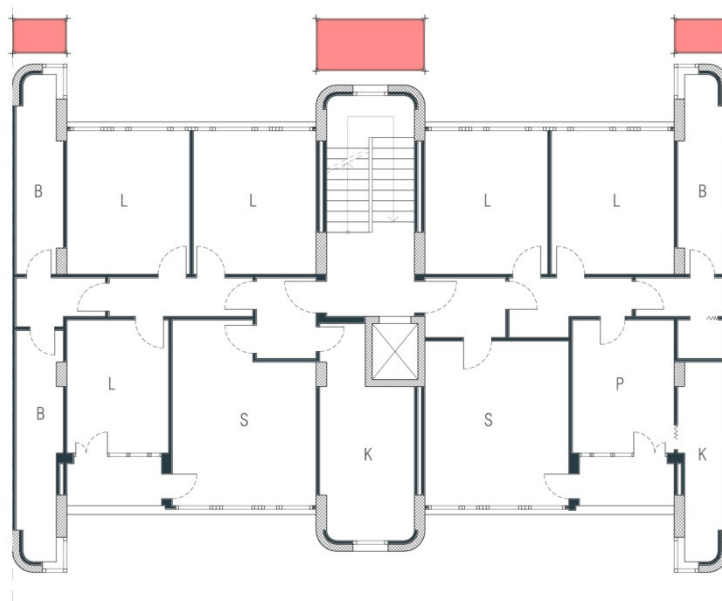


scala 1:100

Pianta



Prospetto

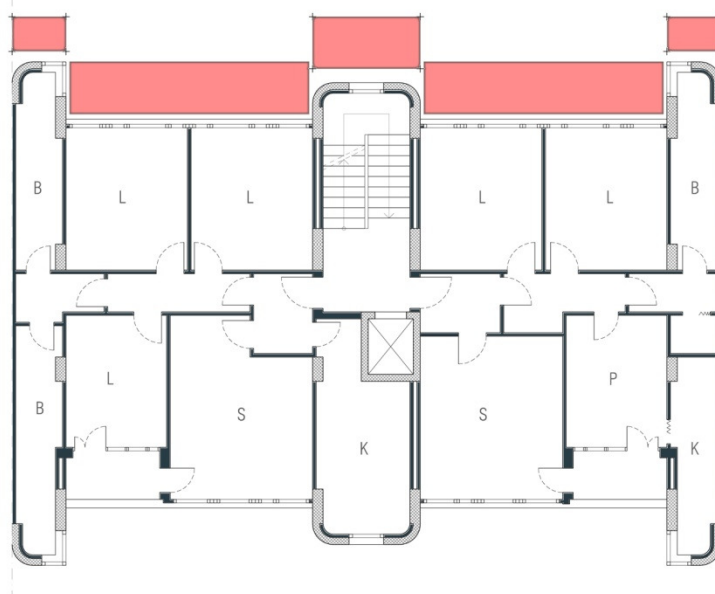


Pianta

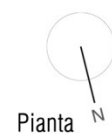
scala 1:100



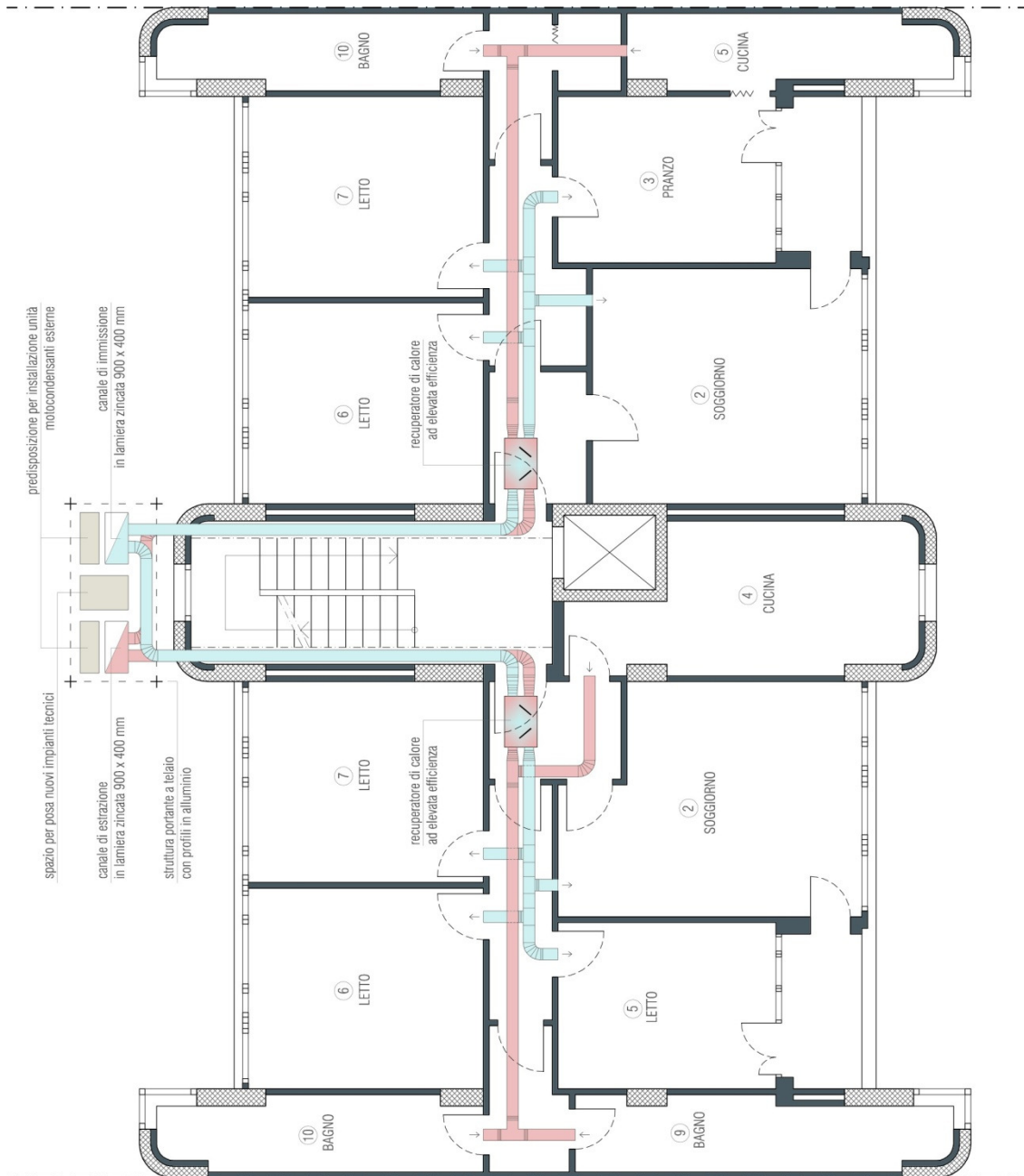
Prospetto

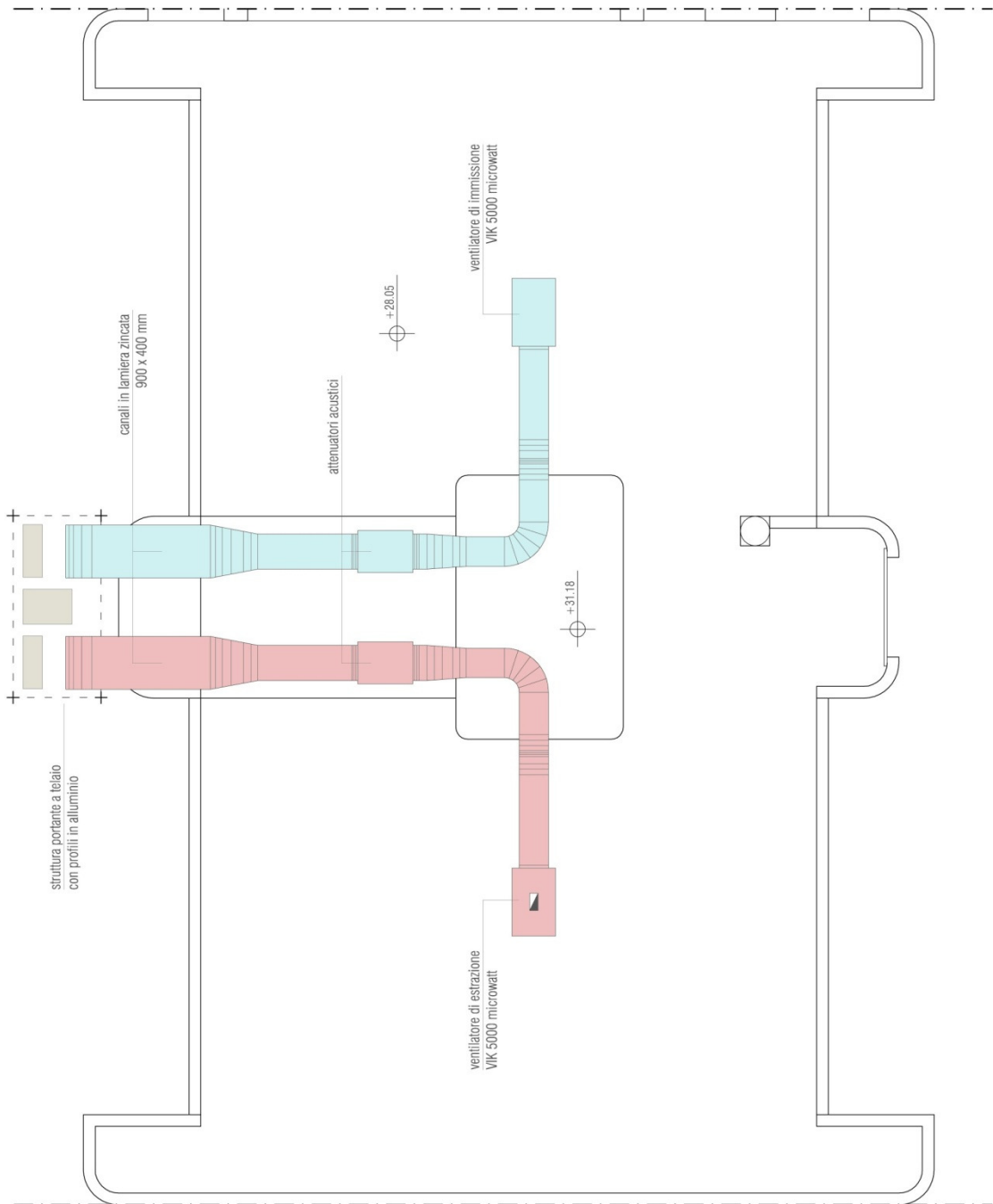


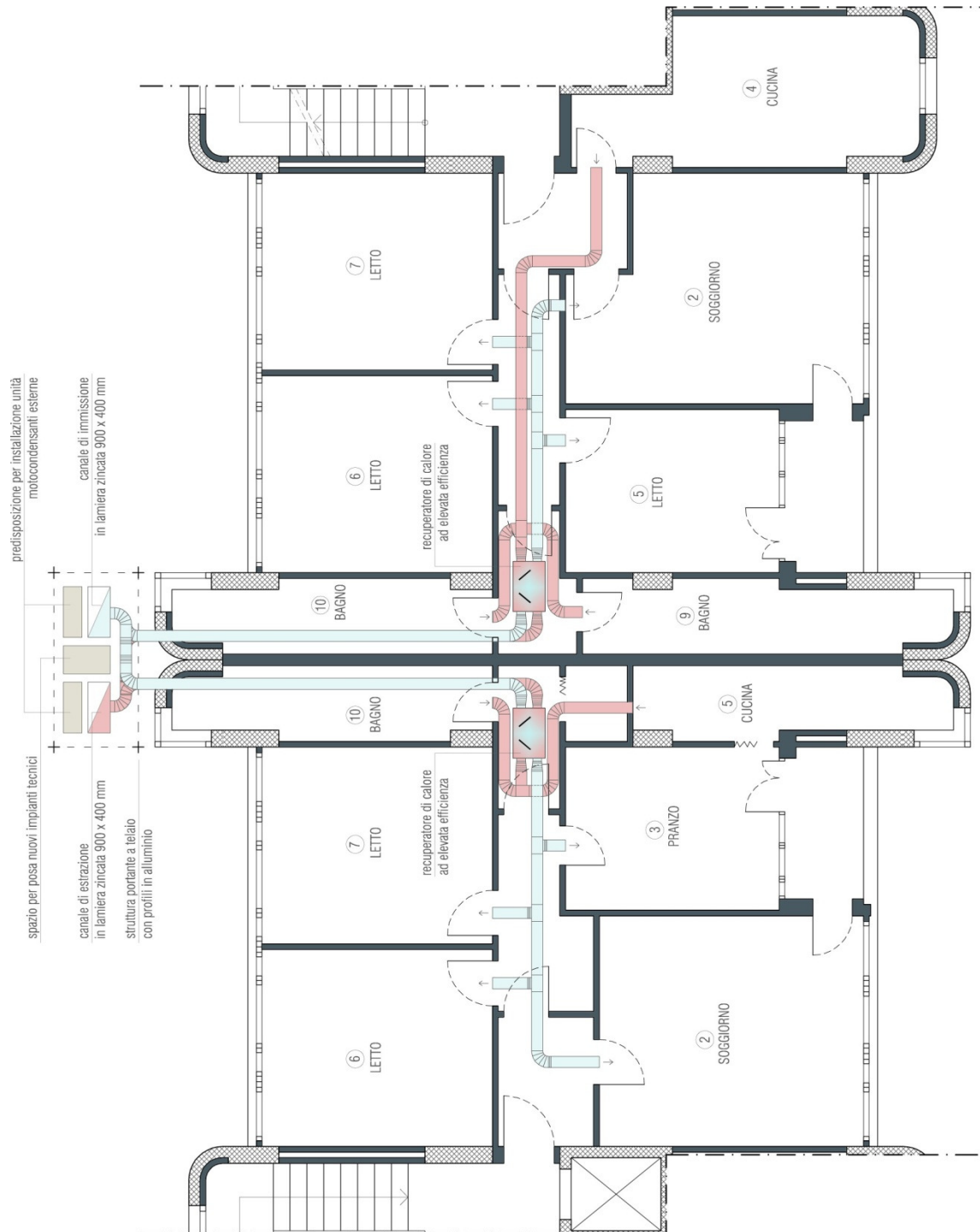
scala 1:100

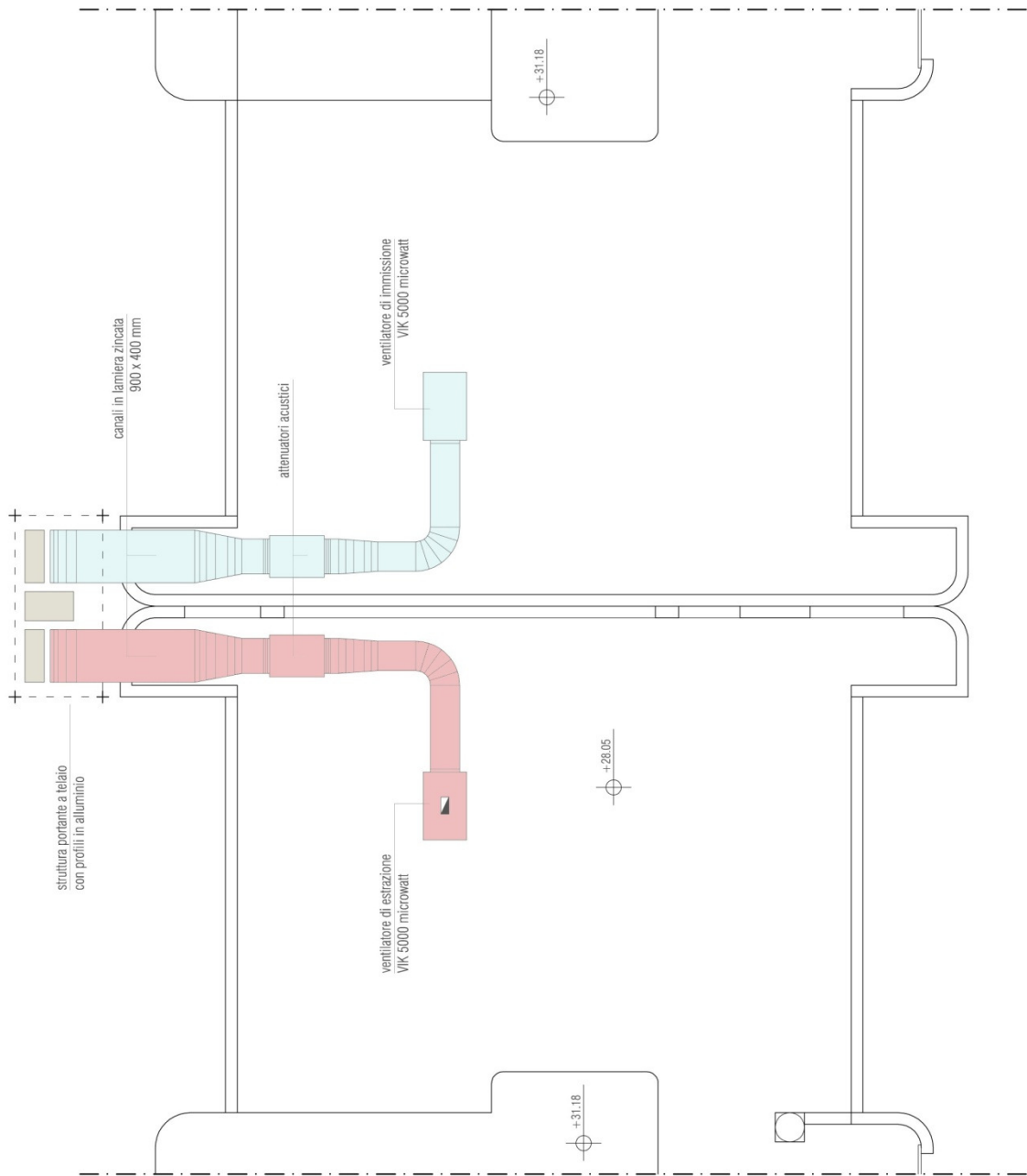


Pianta





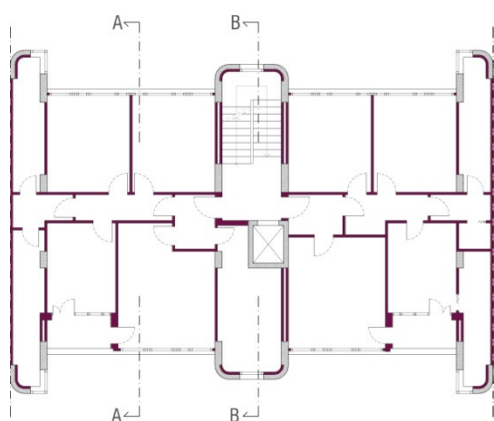




SOLUZIONE	N° elementi tecnici e posizione	VANTAGGI	SVANTAGGI
<u>1</u>	1 - vano scala Sud	<ul style="list-style-type: none"> • Indipendenza dei lavori nei singoli appartamenti • Semplicità distribuzione impianto • Possibilità di integrazione FV e solare termico 	<ul style="list-style-type: none"> • Riduzione luminosità vano scala
<u>2</u>	1 - vano scala + balconi/extrarooms Sud	<ul style="list-style-type: none"> • Indipendenza dei lavori nei singoli appartamenti • Semplicità distribuzione impianto • Possibilità di integrazione FV e solare termico • Notevole ombreggiamento per zona notte 	<ul style="list-style-type: none"> • Riduzione luminosità vano scala • Dimensione balconi notevole per zona notte
<u>3</u>	2 - bagni Sud	<ul style="list-style-type: none"> • Possibilità di integrazione FV e solare termico • Indipendenza dei lavori nei singoli appartamenti 	<ul style="list-style-type: none"> • Distribuzione impianto più complessa • Riduzione luminosità bagni
<u>4</u>	2 - bagno/cucina Nord	<ul style="list-style-type: none"> • Indipendenza dei lavori nei singoli appartamenti 	<ul style="list-style-type: none"> • Distribuzione impianto più complessa • Riduzione luminosità bagni/cucina • Impossibilità di integrazione FV e solare termico
<u>5</u>	2 - bagni + balconi/extrarooms Sud	<ul style="list-style-type: none"> • Possibilità di integrazione FV e solare termico • Indipendenza dei lavori nei singoli appartamenti • Notevole ombreggiamento per zona notte 	<ul style="list-style-type: none"> • Distribuzione impianto più complessa • Riduzione luminosità bagni • Dimensione balconi notevole per zona notte
<u>6</u>	2 - bagno/cucina + balconi/extrarooms Nord	<ul style="list-style-type: none"> • Presenza di balconi per zona giorno • Indipendenza dei lavori nei singoli appartamenti 	<ul style="list-style-type: none"> • Distribuzione impianto più complessa • Impossibilità di integrazione FV e solare termico • Riduzione luminosità bagni/cucina • Riduzione notevole apporti solari
<u>7</u>	3 - bagni/vano scala Sud	<ul style="list-style-type: none"> • Indipendenza dei lavori nei singoli appartamenti • Semplicità distribuzione impianto • Possibilità di integrazione FV e solare termico 	<ul style="list-style-type: none"> • Aumento elementi strutturali
<u>8</u>	3 - bagni/vano scala + balconi/extrarooms Sud	<ul style="list-style-type: none"> • Indipendenza dei lavori nei singoli appartamenti • Semplicità distribuzione impianto • Possibilità di integrazione FV e solare termico • Notevole ombreggiamento per zona notte 	<ul style="list-style-type: none"> • Aumento elementi strutturali • Riduzione luminosità bagni • Dimensione balconi notevole per zona notte

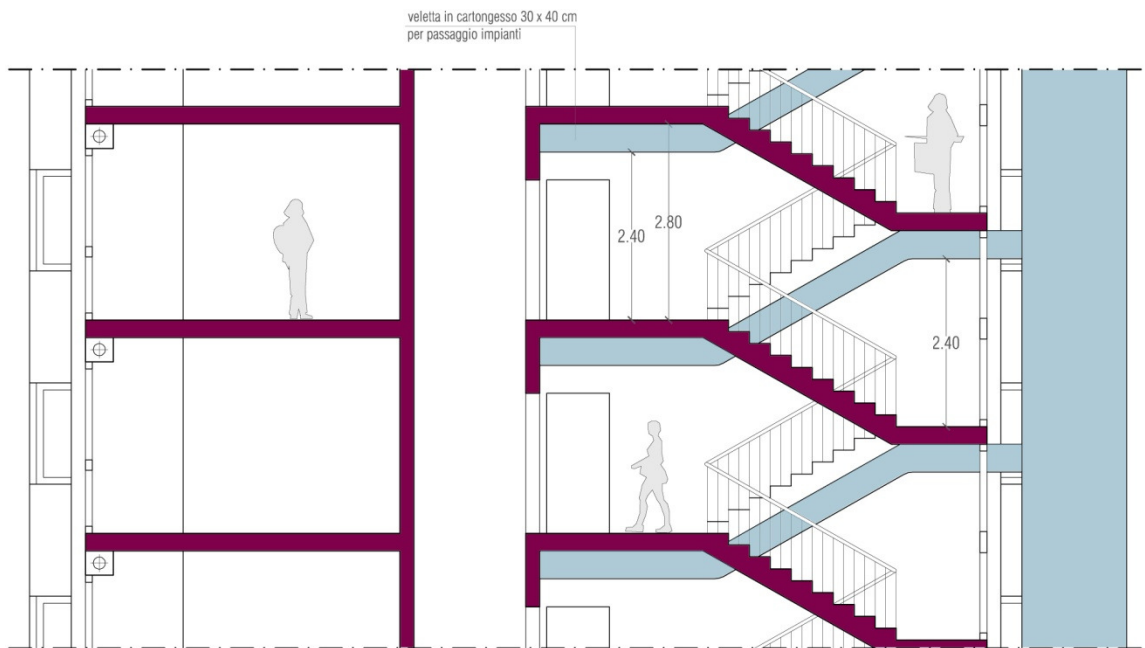
Tabella 4-22 – Vantaggi e svantaggi per le otto soluzioni ipotizzate

La realizzazione dell'impianto di ventilazione si configura, all'interno di ogni alloggio, come la soluzione che prevede il minimo intervento: non sono infatti previste opere murarie consistenti, se non quelle relative ai fori per l'ingresso dei condotti principali ai vari piani e alle aperture per l'inserimento delle bocchette di immissione ed estrazione. La conformazione degli alloggi permette l'installazione della rete impiantistica a livello di controsoffitto nei locali di passaggio (ingressi e disimpegni) che, da un'altezza originaria di 2,80 m sono ridotti a 2,40 m secondo i minimi di legge. I condotti si snodano all'interno di un controsoffitto tecnico negli alloggi (Figura 4-20) e sono nascosti con una veletta in cartongesso negli spazi comuni (vano scala) (Figura 4-21).



Sezione A-A

Figura 4-20 – Sezione trasversale dell'edificio all'interno degli alloggi



Sezione B-B

Figura 4-21 – Sezione trasversale dell'edificio in corrispondenza del vano scala

4.8 Valutazione dei fabbisogni energetici della ventilazione

A partire da quanto contenuto nella norma UNI EN ISO 13790:2008 è possibile ricavare i valori dei fabbisogni energetici riferiti alla “componente” ventilazione.

I dati qui riportati sono stati ricavati con il software MC4 e verificati con le indicazioni contenute nella normativa sopraindicata. Si considerano per questa valutazione tre appartamenti della stessa tipologia ubicati in posizioni diverse all'interno dell'edificio; in particolare si analizza l'appartamento precedentemente indicato con il numero 1 posto al primo piano, al piano quarto e all'ultimo piano (ottavo). I calcoli vengono effettuati in quattro situazioni differenti descritte successivamente.

4.8.1 Stato di fatto

4.8.1.1 Appartamento 1 piano primo

Si considerano diversi ricambi orari, in funzione della tipologia dell'impianto di ventilazione, dell'eventuale utilizzo a portata fissa o variabile con/senza recuperatore di calore statico.

Caso 1:

ventilazione naturale, $n = 0,3 \text{ h}^{-1}$ secondo
UNI TS 11300 (valore ottenuto anche
con infiltrazione e aerazione controllata)

Mese	$Q_{H,tr}$	$Q_{H,ve}$
	[MJ]	[MJ]
Ott	4.107,96	333,31
Nov	9.211,99	756,59
Dic	16.808,36	1.407,25
Gen	15.897,20	1.329,07
Feb	12.712,79	1.059,22
Mar	10.430,22	859,99
Apr	2.657,57	211,11
TOT.	71.826,09	5.956,54

Mese	Q _{H,tr}	Q _{H,ve}
	[MJ]	[MJ]
Ott	4.107,96	877,70
Nov	9.211,99	1.992,35
Dic	16.808,36	3.705,77
Gen	15.897,20	3.499,89
Feb	12.712,79	2.789,29
Mar	10.430,22	2.264,63
Apr	2.657,57	555,93
TOT.	71.826,09	15.685,56

Caso 2:
 ventilazione naturale, $n = 0,79 \text{ h}^{-1}$
 (secondo portate d'aria calcolate)

Caso 3:
 ventilazione meccanica, $n = 0,79 \text{ h}^{-1}$
 rendimento del recuperatore $\eta = 0,5$
 portata fissa ($k = 1$)

Mese	Q _{H,tr}	Q _{H,ve}
	[MJ]	[MJ]
Ott	4.107,96	438,85
Nov	9.211,99	996,17
Dic	16.808,36	1.852,88
Gen	15.897,20	1.749,95
Feb	12.712,79	1.394,64
Mar	10.430,22	1.132,32
Apr	2.657,57	277,96
TOT.	71.826,09	7.842,77

Mese	Q _{H,tr}	Q _{H,ve}
	[MJ]	[MJ]
Ott	4.107,96	263,31
Nov	9.211,99	597,70
Dic	16.808,36	1.111,73
Gen	15.897,20	1.049,97
Feb	12.712,79	836,79
Mar	10.430,22	679,39
Apr	2.657,57	166,78
TOT.	71.826,09	4.705,67

Caso 4:
 ventilazione meccanica, $n = 0,79 \text{ h}^{-1}$
 rendimento del recuperatore $\eta = 0,5$
 portata variabile ($k = 0,6$)

Caso 5:

ventilazione meccanica, $n = 0,79 \text{ h}^{-1}$

rendimento del recuperatore $\eta = 0,7$

portata fissa ($k = 1$)

Mese	$Q_{H,tr}$	$Q_{H,ve}$
	[MJ]	[MJ]
Ott	4.107,96	263,31
Nov	9.211,99	597,70
Dic	16.808,36	1.111,73
Gen	15.897,20	1.049,97
Feb	12.712,79	836,79
Mar	10.430,22	679,39
Apr	2.657,57	166,78
TOT.	71.826,09	4.705,67

Mese	$Q_{H,tr}$	$Q_{H,ve}$
	[MJ]	[MJ]
Ott	4.107,96	157,99
Nov	9.211,99	358,62
Dic	16.808,36	667,04
Gen	15.897,20	629,98
Feb	12.712,79	502,07
Mar	10.430,22	407,63
Apr	2.657,57	100,07
TOT.	71.826,09	2.823,4

Caso 6:

ventilazione meccanica, $n = 0,79 \text{ h}^{-1}$

rendimento del recuperatore $\eta = 0,7$

portata variabile ($k = 0,6$)

Mese	$Q_{H,tr}$	$Q_{H,ve}$
	[MJ]	[MJ]
Ott	4.107,96	175,54
Nov	9.211,99	398,47
Dic	16.808,36	741,15
Gen	15.897,20	699,98
Feb	12.712,79	557,86
Mar	10.430,22	452,93
Apr	2.657,57	111,19
TOT.	71.826,09	3.137,12

Caso 7:

ventilazione meccanica, $n = 0,79 \text{ h}^{-1}$

rendimento del recuperatore $\eta = 0,8$

portata fissa ($k = 1$)

Mese	Q _{H,tr}	Q _{H,ve}
	[MJ]	[MJ]
Ott	4.107,96	105,32
Nov	9.211,99	239,08
Dic	16.808,36	444,69
Gen	15.897,20	419,99
Feb	12.712,79	334,71
Mar	10.430,22	271,76
Apr	2.657,57	66,71
TOT.	71.826,09	1.882,26

Caso 8:
 ventilazione meccanica, $n = 0,79 \text{ h}^{-1}$
 rendimento del recuperatore $\eta = 0,8$
 portata variabile ($k = 0,6$)

Caso 9:
 ventilazione meccanica, $n = 0,79 \text{ h}^{-1}$
 rendimento del recuperatore $\eta = 0,9$
 portata fissa ($k = 1$)

Mese	Q _{H,tr}	Q _{H,ve}
	[MJ]	[MJ]
Ott	4.107,96	87,77
Nov	9.211,99	199,23
Dic	16.808,36	370,58
Gen	15.897,20	349,99
Feb	12.712,79	278,93
Mar	10.430,22	226,46
Apr	2.657,57	55,59
TOT.	71.826,09	1.568,55

Mese	Q _{H,tr}	Q _{H,ve}
	[MJ]	[MJ]
Ott	4.107,96	52,66
Nov	9.211,99	119,54
Dic	16.808,36	222,35
Gen	15.897,20	209,99
Feb	12.712,79	167,36
Mar	10.430,22	135,88
Apr	2.657,57	33,36
TOT.	71.826,09	941,14

Caso 10:
 ventilazione meccanica, $n = 0,79 \text{ h}^{-1}$
 rendimento del recuperatore $\eta = 0,9$
 portata variabile ($k = 0,6$)

Si riportano i risultati riassunti in Figura 4-22 e Tabella 4-23 per una più veloce compressione.

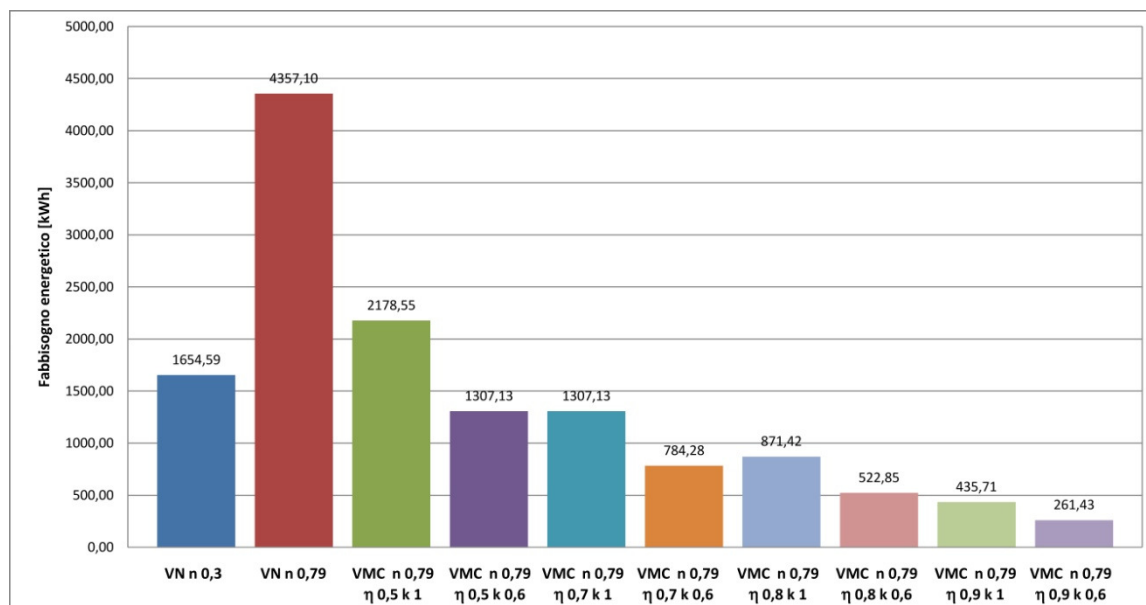


Figura 4-22 - Grafico riassuntivo dei fabbisogni energetici per diverse tipologie di impianto

Soluzione	$Q_{h,tr}$	$Q_{h,ve}$	Incidenza
	MJ	MJ	
VN (n = 0,3)	71826,09	5956,54	8%
VN (n = 0,79)	71826,09	15685,56	22%
VMC (n = 0,79 η = 0,5 k = 1)	71826,09	7842,78	11%
VMC (n = 0,79 η = 0,5 k = 0,6)	71826,09	4705,67	7%
VMC (n = 0,79 η = 0,7 k = 1)	71826,09	4705,67	7%
VMC (n = 0,79 η = 0,7 k = 0,6)	71826,09	2823,40	4%
VMC (n = 0,79 η = 0,8 k = 1)	71826,09	3137,11	4%
VMC (n = 0,79 η = 0,8 k = 0,6)	71826,09	1882,27	3%
VMC (n = 0,79 η = 0,9 k = 1)	71826,09	1568,56	2%
VMC (n = 0,79 η = 0,9 k = 0,6)	71826,09	941,13	1%

Tabella 4-23 - Incidenze percentuali dello scambio per ventilazione rispetto allo scambio per trasmissione per le diverse soluzioni impiantistiche ipotizzate

4.8.1.2 Appartamento 1 piano quarto

Si considerano diversi ricambi orari, in funzione della tipologia dell'impianto di ventilazione, dell'eventuale utilizzo a portata fissa o variabile con/senza recuperatore di calore statico.

Caso 1:

ventilazione naturale, $n = 0,3 \text{ h}^{-1}$ secondo UNI TS 11300 (valore ottenuto anche con infiltrazione e aerazione controllata)

Mese	$Q_{H,tr}$	$Q_{H,ve}$
	[MJ]	[MJ]
Ott	2.441,10	333,31
Nov	5.428,31	756,59
Dic	9.770,71	1.407,25
Gen	9.250,53	1.329,07
Feb	7.415,63	1.059,22
Mar	6.129,43	859,99
Apr	1.601,80	211,11
TOT.	42.037,51	5.956,54

Mese	$Q_{H,tr}$	$Q_{H,ve}$
	[MJ]	[MJ]
Ott	2.441,10	877,70
Nov	5.428,31	1.992,35
Dic	9.770,71	3.705,77
Gen	9.250,53	3.499,89
Feb	7.415,63	2.789,29
Mar	6.129,43	2.264,63
Apr	1.601,80	555,93
TOT.	42.037,51	15.685,56

Caso 2:

ventilazione naturale, $n = 0,79 \text{ h}^{-1}$
(secondo portate d'aria calcolate)

Caso 3:

ventilazione meccanica, $n = 0,79 \text{ h}^{-1}$

rendimento del recuperatore $\eta = 0,5$

portata fissa ($k = 1$)

Mese	$Q_{H,tr}$	$Q_{H,ve}$
	[MJ]	[MJ]
Ott	2.441,10	438,85
Nov	5.428,31	996,17
Dic	9.770,71	1.852,88
Gen	9.250,53	1.749,95
Feb	7.415,63	1.394,64
Mar	6.129,43	1.132,32
Apr	1.601,80	277,96
TOT.	42.037,51	7.842,77

Mese	$Q_{H,tr}$	$Q_{H,ve}$
	[MJ]	[MJ]
Ott	2.441,10	263,31
Nov	5.428,31	597,70
Dic	9.770,71	1.111,73
Gen	9.250,53	1.049,97
Feb	7.415,63	836,79
Mar	6.129,43	679,39
Apr	1.601,80	166,78
TOT.	42.037,51	4.705,67

Caso 4:

ventilazione meccanica, $n = 0,79 \text{ h}^{-1}$

rendimento del recuperatore $\eta = 0,5$

portata variabile ($k = 0,6$)

Mese	$Q_{H,tr}$	$Q_{H,ve}$
	[MJ]	[MJ]
Ott	2.441,10	263,31
Nov	5.428,31	597,70
Dic	9.770,71	1.111,73
Gen	9.250,53	1.049,97
Feb	7.415,63	836,79
Mar	6.129,43	679,39
Apr	1.601,80	166,78
TOT.	42.037,51	4.705,67

Caso 5:

ventilazione meccanica, $n = 0,79 \text{ h}^{-1}$

rendimento del recuperatore $\eta = 0,7$

portata fissa ($k = 1$)

Mese	Q _{H,tr}	Q _{H,ve}
	[MJ]	[MJ]
Ott	2.441,10	157,99
Nov	5.428,31	358,62
Dic	9.770,71	667,04
Gen	9.250,53	629,98
Feb	7.415,63	502,07
Mar	6.129,43	407,63
Apr	1.601,80	100,07
TOT.	42.037,51	2.823,4

Caso 6:
ventilazione meccanica, $n = 0,79 \text{ h}^{-1}$
rendimento del recuperatore $\eta = 0,7$
portata variabile ($k = 0,6$)

Mese	Q _{H,tr}	Q _{H,ve}
	[MJ]	[MJ]
Ott	2.441,10	175,54
Nov	5.428,31	398,47
Dic	9.770,71	741,15
Gen	9.250,53	699,98
Feb	7.415,63	557,86
Mar	6.129,43	452,93
Apr	1.601,80	111,19
TOT.	42.037,51	3.137,12

Caso 7:
ventilazione meccanica, $n = 0,79 \text{ h}^{-1}$
rendimento del recuperatore $\eta = 0,8$
portata fissa ($k = 1$)

Mese	Q _{H,tr}	Q _{H,ve}
	[MJ]	[MJ]
Ott	2.441,10	105,32
Nov	5.428,31	239,08
Dic	9.770,71	444,69
Gen	9.250,53	419,99
Feb	7.415,63	334,71
Mar	6.129,43	271,76
Apr	1.601,80	66,71
TOT.	42.037,51	1.882,26

Caso 8:
ventilazione meccanica, $n = 0,79 \text{ h}^{-1}$
rendimento del recuperatore $\eta = 0,8$
portata variabile ($k = 0,6$)

Caso 9:

ventilazione meccanica, $n = 0,79 \text{ h}^{-1}$

rendimento del recuperatore $\eta = 0,9$

portata fissa ($k = 1$)

Mese	$Q_{H,tr}$	$Q_{H,ve}$
	[MJ]	[MJ]
Ott	2.441,10	87,77
Nov	5.428,31	199,23
Dic	9.770,71	370,58
Gen	9.250,53	349,99
Feb	7.415,63	278,93
Mar	6.129,43	226,46
Apr	1.601,80	55,59
TOT.	42.037,51	1.568,55

Mese	$Q_{H,tr}$	$Q_{H,ve}$
	[MJ]	[MJ]
Ott	2.441,10	52,66
Nov	5.428,31	119,54
Dic	9.770,71	222,35
Gen	9.250,53	209,99
Feb	7.415,63	167,36
Mar	6.129,43	135,88
Apr	1.601,80	33,36
TOT.	42.037,51	941,14

Caso 10:

ventilazione meccanica, $n = 0,79 \text{ h}^{-1}$

rendimento del recuperatore $\eta = 0,9$

portata variabile ($k = 0,6$)

Si riportano i risultati riassunti in Figura 4-23 e Tabella 4-24 per una più veloce compressione.

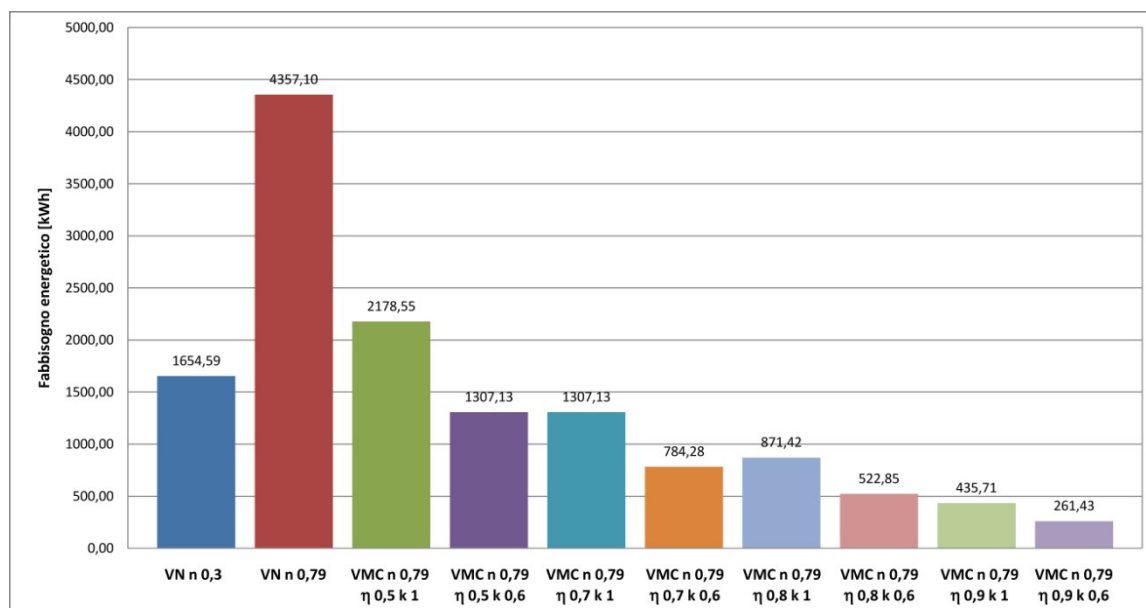


Figura 4-23 - Grafico riassuntivo dei fabbisogni energetici per diverse tipologie di impianto

Soluzione	$Q_{h,tr}$	$Q_{h,ve}$	Incidenza
	MJ	MJ	
VN (n = 0,3)	42037,51	5956,54	14%
VN (n = 0,79)	42037,51	15685,56	37%
VMC (n = 0,79 η = 0,5 k = 1)	42037,51	7842,78	19%
VMC (n = 0,79 η = 0,5 k = 0,6)	42037,51	4705,67	11%
VMC (n = 0,79 η = 0,7 k = 1)	42037,51	4705,67	11%
VMC (n = 0,79 η = 0,7 k = 0,6)	42037,51	2823,40	7%
VMC (n = 0,79 η = 0,8 k = 1)	42037,51	3137,11	7%
VMC (n = 0,79 η = 0,8 k = 0,6)	42037,51	1882,27	4%
VMC (n = 0,79 η = 0,9 k = 1)	42037,51	1568,56	4%
VMC (n = 0,79 η = 0,9 k = 0,6)	42037,51	941,13	2%

Tabella 4-24 - Incidenze percentuali dello scambio per ventilazione rispetto allo scambio per trasmissione per le diverse soluzioni impiantistiche ipotizzate

4.8.1.3 Appartamento 1 piano ottavo

Si considerano diversi ricambi orari, in funzione della tipologia dell'impianto di ventilazione, dell'eventuale utilizzo a portata fissa o variabile con/senza recuperatore di calore statico.

Caso 1:

ventilazione naturale, $n = 0,3 \text{ h}^{-1}$ secondo
UNI TS 11300 (valore ottenuto anche
con infiltrazione e aerazione controllata)

Mese	$Q_{H,tr}$	$Q_{H,ve}$
	[MJ]	[MJ]
Ott	4.933,25	333,31
Nov	10.832,47	756,59
Dic	19.092,27	1.407,25
Gen	18.104,93	1.329,07
Feb	14.569,26	1.059,22
Mar	12.180,89	859,99
Apr	3.304,91	211,11
TOT.	83.017,98	5.956,54

Mese	$Q_{H,tr}$	$Q_{H,ve}$
	[MJ]	[MJ]
Ott	4.933,25	877,70
Nov	10.832,47	1.992,35
Dic	19.092,27	3.705,77
Gen	18.104,93	3.499,89
Feb	14.569,26	2.789,29
Mar	12.180,89	2.264,63
Apr	3.304,91	555,93
TOT.	83.017,98	15.685,56

Caso 2:

ventilazione naturale, $n = 0,79 \text{ h}^{-1}$
(secondo portate d'aria calcolate)

Mese	$Q_{H,tr}$	$Q_{H,ve}$
	[MJ]	[MJ]
Ott	4.933,25	438,85
Nov	10.832,47	996,17
Dic	19.092,27	1.852,88
Gen	18.104,93	1.749,95
Feb	14.569,26	1.394,64
Mar	12.180,89	1.132,32
Apr	3.304,91	277,96
TOT.	83.017,98	7.842,77

Caso 3:

ventilazione meccanica, $n = 0,79 \text{ h}^{-1}$
rendimento del recuperatore $\eta = 0,5$
portata fissa ($k = 1$)

Mese	$Q_{H,tr}$	$Q_{H,ve}$
	[MJ]	[MJ]
Ott	4.933,25	263,31
Nov	10.832,47	597,70
Dic	19.092,27	1.111,73
Gen	18.104,93	1.049,97
Feb	14.569,26	836,79
Mar	12.180,89	679,39
Apr	3.304,91	166,78
TOT.	83.017,98	4.705,67

Caso 4:
ventilazione meccanica, $n = 0,79 \text{ h}^{-1}$
rendimento del recuperatore $\eta = 0,5$
portata variabile ($k = 0,6$)

Caso 5:
ventilazione meccanica, $n = 0,79 \text{ h}^{-1}$
rendimento del recuperatore $\eta = 0,7$
portata fissa ($k = 1$)

Mese	$Q_{H,tr}$	$Q_{H,ve}$
	[MJ]	[MJ]
Ott	4.933,25	263,31
Nov	10.832,47	597,70
Dic	19.092,27	1.111,73
Gen	18.104,93	1.049,97
Feb	14.569,26	836,79
Mar	12.180,89	679,39
Apr	3.304,91	166,78
TOT.	83.017,98	4.705,67

Mese	$Q_{H,tr}$	$Q_{H,ve}$
	[MJ]	[MJ]
Ott	4.933,25	157,99
Nov	10.832,47	358,62
Dic	19.092,27	667,04
Gen	18.104,93	629,98
Feb	14.569,26	502,07
Mar	12.180,89	407,63
Apr	3.304,91	100,07
TOT.	83.017,98	2.823,4

Caso 6:
ventilazione meccanica, $n = 0,79 \text{ h}^{-1}$
rendimento del recuperatore $\eta = 0,7$
portata variabile ($k = 0,6$)

Caso 7:

ventilazione meccanica, $n = 0,79 \text{ h}^{-1}$

rendimento del recuperatore $\eta = 0,8$

portata fissa ($k = 1$)

Mese	$Q_{H,tr}$	$Q_{H,ve}$
	[MJ]	[MJ]
Ott	4.933,25	175,54
Nov	10.832,47	398,47
Dic	19.092,27	741,15
Gen	18.104,93	699,98
Feb	14.569,26	557,86
Mar	12.180,89	452,93
Apr	3.304,91	111,19
TOT.	83.017,98	3.137,12

Mese	$Q_{H,tr}$	$Q_{H,ve}$
	[MJ]	[MJ]
Ott	4.933,25	105,32
Nov	10.832,47	239,08
Dic	19.092,27	444,69
Gen	18.104,93	419,99
Feb	14.569,26	334,71
Mar	12.180,89	271,76
Apr	3.304,91	66,71
TOT.	83.017,98	1.882,26

Caso 8:

ventilazione meccanica, $n = 0,79 \text{ h}^{-1}$

rendimento del recuperatore $\eta = 0,8$

portata variabile ($k = 0,6$)

Mese	$Q_{H,tr}$	$Q_{H,ve}$
	[MJ]	[MJ]
Ott	4.933,25	87,77
Nov	10.832,47	199,23
Dic	19.092,27	370,58
Gen	18.104,93	349,99
Feb	14.569,26	278,93
Mar	12.180,89	226,46
Apr	3.304,91	55,59
TOT.	83.017,98	1.568,55

Caso 9:

ventilazione meccanica, $n = 0,79 \text{ h}^{-1}$

rendimento del recuperatore $\eta = 0,9$

portata fissa ($k = 1$)

Mese	$Q_{H,tr}$	$Q_{H,ve}$
	[MJ]	[MJ]
Ott	4.933,25	52,66
Nov	10.832,47	119,54
Dic	19.092,27	222,35
Gen	18.104,93	209,99
Feb	14.569,26	167,36
Mar	12.180,89	135,88
Apr	3.304,91	33,36
TOT.	83.017,98	941,14

Caso 10:
 ventilazione meccanica, $n = 0,79 \text{ h}^{-1}$
 rendimento del recuperatore $\eta = 0,9$
 portata variabile ($k = 0,6$)

Si riportano i risultati riassunti in Figura 4-24 e Tabella 4-25 per una più veloce comprensione.

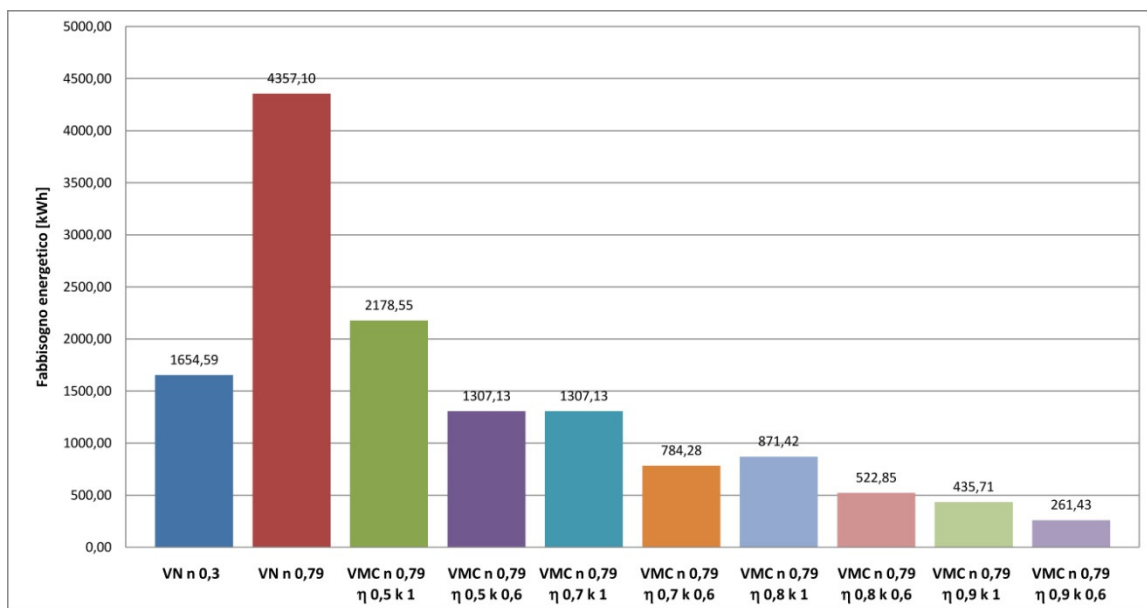


Figura 4-24 - Grafico riassuntivo dei fabbisogni energetici per diverse tipologie di impianto

Soluzione	$Q_{h,tr}$	$Q_{h,ve}$	Incidenza
	MJ	MJ	
VN (n = 0,3)	83017,98	5956,54	7%
VN (n = 0,79)	83017,98	15685,56	19%
VMC (n = 0,79 η = 0,5 k = 1)	83017,98	7842,78	9%
VMC (n = 0,79 η = 0,5 k = 0,6)	83017,98	4705,67	6%
VMC (n = 0,79 η = 0,7 k = 1)	83017,98	4705,67	6%
VMC (n = 0,79 η = 0,7 k = 0,6)	83017,98	2823,40	3%
VMC (n = 0,79 η = 0,8 k = 1)	83017,98	3137,11	4%
VMC (n = 0,79 η = 0,8 k = 0,6)	83017,98	1882,27	2%
VMC (n = 0,79 η = 0,9 k = 1)	83017,98	1568,56	2%
VMC (n = 0,79 η = 0,9 k = 0,6)	83017,98	261,43	0,3%

Tabella 4-25 - Incidenze percentuali dello scambio per ventilazione rispetto allo scambio per trasmissione per le diverse soluzioni impiantistiche ipotizzate

4.8.2 Ipotesi di intervento n°1

Questa ipotesi prevede diverse tipologie di intervento:

- Miglioramento dell'impianto esistente: sostituzione degli attuali *fan-coil* con radiatori dotati di valvole termostatiche e ripartitori di calore.
- Bilanciamento dell'impianto attraverso la sostituzione dell'attuale sistema di pompaggio con pompe a velocità variabile; installazione di valvole di sfioro alla base delle colonne montanti dell'impianto per tenere sotto controllo le pressioni differenziali in rete; installazione di *autoflow* per bilanciare le portate delle colonne.
- Intervento sull'involucro: coibentazione con pannelli di EPS (sp.12 cm) delle pareti laterali (Est e Ovest), del solaio di copertura e di quello del primo piano.

A seguito delle prime due modifiche il rendimento globale dell'impianto η_g passa da 0,682 a 0,704 (Brandimarti, 2013). L'ultimo intervento modifica i valori di trasmittanza dei pacchetti interessati; a tale scopo si riportano in Tabella 4-26 i valori delle trasmittanze prima e dopo questo tipo di intervento, verificando come i nuovi valori siano inferiori ai limiti imposti a livello regionale ma soprattutto a quelli nazionali per poter accedere alle detrazioni fiscali per interventi di ristrutturazione e riqualificazione energetica.

Struttura	U _{pre}	U _{post}	U _{lim,reg}	verifica	U _{lim,naz}	verifica
	W/m ² K	W/m ² K	W/m ² K		W/m ² K	
<i>Parete esterna laterale</i>	2,396	0,254	0,34	✓	0,27	✓
<i>Solaio primo piano</i>	1,381	0,235	0,33	✓	0,3	✓
<i>Solaio copertura</i>	1,651	0,24	0,3	✓	0,24	✓

Tabella 4-26 - Trasmittanze pre e post intervento e verifica con i valori limite regionali e nazionali

4.8.2.1 Appartamento 1 piano primo

Si considerano due soluzioni estreme: aereazione e ventilazione meccanica con recuperatore di calore statico con efficienza pari al 90% e portata fissa.

Caso 1:

ventilazione naturale, $n = 0,79 \text{ h}^{-1}$
(secondo portate d'aria calcolate)

Mese	Q _{H,tr}	Q _{H,ve}
	[MJ]	[MJ]
Ott	2.711,53	877,70
Nov	6.042,16	1.992,35
Dic	10.912,48	3.705,77
Gen	10.328,87	3.499,89
Feb	8.275,03	2.789,29
Mar	6.827,18	2.264,63
Apr	1.773,08	555,93
TOT.	46.870,33	15.685,56

Mese	Q _{H,tr}	Q _{H,ve}
	[MJ]	[MJ]
Ott	2.711,53	52,64
Nov	6.042,16	119,54
Dic	10.912,48	222,35
Gen	10.328,87	210,00
Feb	8.275,03	167,36
Mar	6.827,18	135,88
Apr	1.773,08	33,35
TOT.	46.870,33	941,12

Caso 2:

ventilazione meccanica, $n = 0,79 \text{ h}^{-1}$
rendimento recuperatore $\eta = 0,9$
portata variabile $k = 0,6$

Si riportano i risultati in Tabella 4-27 per una più veloce comprensione.

Soluzione	$Q_{h,tr}$	$Q_{h,ve}$	Incidenza
	MJ	MJ	
VN (n = 0,79)	46870,33	15685,56	33%
VMC (n = 0,79 η = 0,9 k = 1)	46870,33	1568,56	3%

Tabella 4-27 - Incidenze percentuali dello scambio per ventilazione rispetto allo scambio per trasmissione per le due soluzioni impiantistiche ipotizzate

4.8.2.2 Appartamento 1 piano quarto

Si considerano due soluzioni estreme: aereazione e ventilazione meccanica con recuperatore di calore statico con efficienza pari al 90% e portata fissa.

Caso 1:

ventilazione naturale, $n = 0,79 \text{ h}^{-1}$

(secondo portate d'aria calcolate)

Mese	$Q_{H,tr}$	$Q_{H,ve}$
	[MJ]	[MJ]
Ott	2.427,68	877,70
Nov	5.397,84	1.992,35
Dic	9.714,05	3.705,77
Gen	9.197,01	3.499,89
Feb	7.372,98	2.789,29
Mar	6.094,80	2.264,63
Apr	1.593,30	555,93
TOT.	41.797,66	15.685,56

Mese	$Q_{H,tr}$	$Q_{H,ve}$
	[MJ]	[MJ]
Ott	2.427,68	87,70
Nov	5.397,84	199,23
Dic	9.714,05	370,58
Gen	9.197,01	349,99
Feb	7.372,98	278,93
Mar	6.094,80	226,46
Apr	1.593,30	55,59
TOT.	41.797,66	1.568,56

Caso 2:

ventilazione meccanica, $n = 0,79 \text{ h}^{-1}$

rendimento del recuperatore $\eta = 0,9$

portata fissa ($k = 1$)

Si riportano i risultati in Tabella 4-28 per una più veloce comprensione.

Soluzione	$Q_{h,tr}$	$Q_{h,ve}$	Incidenza
	MJ	MJ	
VN (n = 0,79)	41797,66	15685,56	38%
VMC (n = 0,79 η = 0,9 k = 1)	41797,66	1568,56	4%

Tabella 4-28 - Incidenze percentuali dello scambio per ventilazione rispetto allo scambio per trasmissione per le due soluzioni impiantistiche ipotizzate

4.8.2.3 Appartamento 1 piano ottavo

Si considerano due soluzioni estreme: aereazione e ventilazione meccanica con recuperatore di calore statico con efficienza pari al 90% e portata fissa.

Caso 1:

ventilazione naturale, $n = 0,79 \text{ h}^{-1}$
(secondo portate d'aria calcolate)

Mese	$Q_{H,tr}$	$Q_{H,ve}$
	[MJ]	[MJ]
Ott	2.793,35	877,70
Nov	6.190,82	1.992,35
Dic	11.081,96	3.705,77
Gen	10.496,37	3.499,89
Feb	8.422,73	2.789,29
Mar	6.982,78	2.264,63
Apr	1.843,17	555,93
TOT.	47.811,18	15.685,56

Mese	$Q_{H,tr}$	$Q_{H,ve}$
	[MJ]	[MJ]
Ott	2.793,35	87,77
Nov	6.190,82	199,23
Dic	11.081,96	370,58
Gen	10.496,37	349,99
Feb	8.422,73	278,93
Mar	6.982,78	226,46
Apr	1.843,17	55,59
TOT.	47.811,18	1.568,56

Caso 2:

ventilazione meccanica, $n = 0,79 \text{ h}^{-1}$
rendimento del recuperatore $\eta = 0,9$
portata fissa ($k = 1$)

Si riportano i risultati in Tabella 4-29 per una più veloce comprensione.

Soluzione	$Q_{h,tr}$	$Q_{h,ve}$	Incidenza
	MJ	MJ	
VN (n = 0,79)	47811,18	15685,56	33%
VMC (n = 0,79 η = 0,9 k = 1)	47811,18	1568,56	3%

Tabella 4-29 - Incidenze percentuali dello scambio per ventilazione rispetto allo scambio per trasmissione per le due soluzioni impiantistiche ipotizzate

4.8.3 Ipotesi di intervento n°2

In aggiunta agli interventi previsti nell'ipotesi 1 (par. 5.6.1) si realizza anche la coibentazione delle pareti esterne frontali (Nord e Sud). Si riporta in Tabella 4-30 la variazione di trasmittanza della stratigrafia interessata e la verifica con i limiti imposti a livello regionale e nazionale.

Struttura	U_{pre}	U_{post}	$U_{lim,reg}$	verifica	$U_{lim,naz}$	verifica
	W/m^2K	W/m^2K	W/m^2K		W/m^2K	
<i>Parete esterna frontale</i>	1,075	0,224	0,34	✓	0,27	✓

Tabella 4-30 - Trasmittanze pre e post intervento e verifica con i valori limite regionali e nazionali

4.8.3.1 Appartamento 1 piano primo

Si considerano due soluzioni estreme: aereazione e ventilazione meccanica con recuperatore di calore statico con efficienza pari al 90% e portata fissa.

Caso 1:

ventilazione naturale, $n = 0,79 \text{ h}^{-1}$
(secondo portate d'aria calcolate)

Mese	$Q_{H,tr}$	$Q_{H,ve}$
	[MJ]	[MJ]
Ott	1.221,35	874,34
Nov	2.724,89	1.984,71
Dic	7.931,11	3.691,56
Gen	4.666,68	3.486,47
Feb	3.737,40	2.778,59
Mar	3.080,14	2.255,95
Apr	797,00	553,80
TOT.	21.158,57	15.625,42

Mese	$Q_{H,tr}$	$Q_{H,ve}$
	[MJ]	[MJ]
Ott	1.221,35	87,43
Nov	2.724,89	198,47
Dic	7.931,11	369,16
Gen	4.666,68	348,65
Feb	3.737,40	277,86
Mar	3.080,14	225,60
Apr	797,00	55,38
TOT.	21.158,57	1.562,54

Caso 2:
 ventilazione meccanica, $n = 0,79 \text{ h}^{-1}$
 rendimento del recuperatore $\eta = 0,9$
 portata fissa ($k = 1$)

Si riportano i risultati in Tabella 4-31 per una più veloce comprensione.

Soluzione	$Q_{h,tr}$	$Q_{h,ve}$	Incidenza
	MJ	MJ	
VN ($n = 0,79$)	21158,57	15625,42	74%
VMC ($n = 0,79 \eta = 0,9 k = 1$)	21158,57	1562,54	7%

Tabella 4-31 - Incidenze percentuali dello scambio per ventilazione rispetto allo scambio per trasmissione per le due soluzioni impiantistiche ipotizzate

4.8.3.2 Appartamento 1 piano quarto

Si considerano due soluzioni estreme: aereazione e ventilazione meccanica con recuperatore di calore statico con efficienza pari al 90% e portata fissa.

Caso 1:
 ventilazione naturale, $n = 0,79 \text{ h}^{-1}$
 (secondo portate d'aria calcolate)

Mese	$Q_{H,tr}$	$Q_{H,ve}$
	[MJ]	[MJ]
Ott	939,58	874,34
Nov	2.085,29	1.984,71
Dic	3.741,45	3.691,56
Gen	3.543,12	3.486,47
Feb	2.841,96	2.778,59
Mar	2.353,13	2.255,95
Apr	618,53	553,80
TOT.	16.123,06	15.625,42

Mese	$Q_{H,tr}$	$Q_{H,ve}$
	[MJ]	[MJ]
Ott	939,58	87,43
Nov	2.085,29	198,47
Dic	3.741,45	369,16
Gen	3.543,12	348,65
Feb	2.841,96	277,86
Mar	2.353,13	225,60
Apr	618,53	55,38
TOT.	16.123,06	1.562,54

Caso 2:
 ventilazione meccanica, $n = 0,79 \text{ h}^{-1}$
 rendimento del recuperatore $\eta = 0,9$
 portata fissa ($k = 1$)

Si riportano i risultati in Tabella 4-32 per una più veloce comprensione.

Soluzione	$Q_{h,tr}$	$Q_{h,ve}$	Incidenza
	MJ	MJ	
VN ($n = 0,79$)	16123,06	15625,42	97%
VMC ($n = 0,79 \eta = 0,9 k = 1$)	16123,06	1562,54	10%

Tabella 4-32 - Incidenze percentuali dello scambio per ventilazione rispetto allo scambio per trasmissione per le due soluzioni impiantistiche ipotizzate

4.8.3.3 Appartamento 1 piano ottavo

Si considerano due soluzioni estreme: aereazione e ventilazione meccanica con recuperatore di calore statico con efficienza pari al 90% e portata fissa.

Caso 1:
 ventilazione naturale, $n = 0,79 \text{ h}^{-1}$
 (secondo portate d'aria calcolate)

Mese	$Q_{H,tr}$	$Q_{H,ve}$
	[MJ]	[MJ]
Ott	1.302,82	874,34
Nov	2.872,91	1.984,71
Dic	5.099,81	3.691,56
Gen	4.833,42	3.486,47
Feb	3.884,44	2.778,59
Mar	3.235,07	2.255,95
Apr	866,80	553,80
TOT.	22.095,27	15.625,42

Mese	$Q_{H,tr}$	$Q_{H,ve}$
	[MJ]	[MJ]
Ott	1.302,82	87,43
Nov	2.872,91	198,47
Dic	5.099,81	369,16
Gen	4.833,42	348,65
Feb	3.884,44	277,86
Mar	3.235,07	225,60
Apr	866,80	55,38
TOT.	22.095,27	1.562,54

Caso 2:
 ventilazione meccanica, $n = 0,79 \text{ h}^{-1}$
 rendimento del recuperatore $\eta = 0,9$
 portata fissa ($k = 1$)

Si riportano i risultati in Tabella 4-33 per una più veloce comprensione.

Soluzione	$Q_{h,tr}$	$Q_{h,ve}$	Incidenza
	MJ	MJ	
VN ($n = 0,79$)	22095,27	15625,42	71%
VMC ($n = 0,79 \eta = 0,9 k = 1$)	22095,27	1562,54	7%

Tabella 4-33 - Incidenze percentuali dello scambio per ventilazione rispetto allo scambio per trasmissione per le due soluzioni impiantistiche ipotizzate

4.8.4 Ipotesi di intervento n°3

In aggiunta agli interventi realizzati nell'ipotesi 2 si procede alla sostituzione degli infissi dell'edificio con serramenti dotati di prestazioni termoisolanti migliori.

Gli infissi allo stato attuale sono costituiti da un normale vetrocamera 4-8-4; si prevede l'utilizzo di un serramento in PVC con vetrocamera bassoemissivo ($\epsilon = 0,2$ applicato alla vetrata esterna) e intercapedine riempita con gas argon (4+12 argon+4).

In Tabella 4-34 si riporta la variazione di trasmittanza dei serramenti e la verifica con i limiti imposti a livello regionale e nazionale.

Struttura	U_{pre}	U_{post}	$U_{lim,reg}$	verifica	$U_{lim,naz}$	verifica
	W/m^2K	W/m^2K	W/m^2K		W/m^2K	
<i>Infisso</i>	3,08	1,78	2,2	✓	1,8	✓

Tabella 4-34 - Trasmittanza pre e post intervento e verifica con i valori limite regionali e nazionali

4.8.4.1 Appartamento 1 piano primo

Si considerano due soluzioni estreme: aereazione e ventilazione meccanica con recuperatore di calore statico con efficienza pari al 90% e portata fissa.

Caso 1:

ventilazione naturale, $n = 0,79 \text{ h}^{-1}$
(secondo portate d'aria calcolate)

Mese	$Q_{H,tr}$	$Q_{H,ve}$
	[MJ]	[MJ]
Ott	886,81	874,34
Nov	2.001,41	1.984,71
Dic	3.689,07	3.691,56
Gen	3.486,45	3.486,47
Feb	2.783,03	2.778,59
Mar	2.270,74	2.255,95
Apr	567,42	553,80
TOT.	15.684,93	15.625,42

Mese	$Q_{H,tr}$	$Q_{H,ve}$
	[MJ]	[MJ]
Ott	886,81	87,43
Nov	2.001,41	198,47
Dic	3.689,07	369,16
Gen	3.486,45	348,65
Feb	2.783,03	277,86
Mar	2.270,74	225,60
Apr	567,42	55,38
TOT.	15.684,93	1.562,54

Caso 2:

ventilazione meccanica, $n = 0,79 \text{ h}^{-1}$
rendimento del recuperatore $\eta = 0,9$
portata fissa ($k = 1$)

Si riportano i risultati in Tabella 4-35 per una più veloce comprensione.

Soluzione	$Q_{h,tr}$	$Q_{h,ve}$	Incidenza
	MJ	MJ	
VN ($n = 0,79$)	15684,93	15625,42	99,6%
VMC ($n = 0,79 \eta = 0,9 k = 1$)	15684,93	1562,54	10%

Tabella 4-35 - Incidenze percentuali dello scambio per ventilazione rispetto allo scambio per trasmissione per le due soluzioni impiantistiche ipotizzate

4.8.4.2 Appartamento 1 piano quarto

Si considerano due soluzioni estreme: aereazione e ventilazione meccanica con recuperatore di calore statico con efficienza pari al 90% e portata fissa.

Caso 1:

ventilazione naturale, $n = 0,79 \text{ h}^{-1}$

(secondo portate d'aria calcolate)

Mese	$Q_{H,tr}$	$Q_{H,ve}$
	[MJ]	[MJ]
Ott	605,03	874,34
Nov	1.361,78	1.984,71
Dic	2.499,37	3.691,56
Gen	2.362,85	3.486,47
Feb	1.887,56	2.778,59
Mar	1.543,70	2.255,95
Apr	388,95	553,80
TOT.	10.649,24	15.625,42

Mese	$Q_{H,tr}$	$Q_{H,ve}$
	[MJ]	[MJ]
Ott	605,03	87,43
Nov	1.361,78	198,47
Dic	2.499,37	369,16
Gen	2.362,85	348,65
Feb	1.887,56	277,86
Mar	1.543,70	225,60
Apr	388,95	55,38
TOT.	10.649,24	1.562,54

Caso 2:

ventilazione meccanica, $n = 0,79 \text{ h}^{-1}$

rendimento del recuperatore $\eta = 0,9$

portata fissa ($k = 1$)

Si riportano i risultati in Tabella 4-36 per una più veloce comprensione.

Soluzione	$Q_{h,tr}$	$Q_{h,ve}$	Incidenza
	MJ	MJ	
VN ($n = 0,79$)	10649,24	15625,42	147%
VMC ($n = 0,79 \eta = 0,9 k = 1$)	10649,24	1562,54	15%

Tabella 4-36 - Incidenze percentuali dello scambio per ventilazione rispetto allo scambio per trasmissione per le due soluzioni impiantistiche ipotizzate

4.8.4.3 Appartamento 1 piano ottavo

Si considerano due soluzioni estreme: aereazione e ventilazione meccanica con recuperatore di calore statico con efficienza pari al 90% e portata fissa.

Caso 1:

ventilazione naturale, $n = 0,79 \text{ h}^{-1}$
(secondo portate d'aria calcolate)

Mese	$Q_{H,tr}$	$Q_{H,ve}$
	[MJ]	[MJ]
Ott	968,29	874,34
Nov	2.149,43	1.984,71
Dic	3.857,77	3.691,56
Gen	3.653,18	3.486,47
Feb	2.930,07	2.778,59
Mar	2.425,66	2.255,95
Apr	637,22	553,80
TOT.	16.621,62	15.625,42

Mese	$Q_{H,tr}$	$Q_{H,ve}$
	[MJ]	[MJ]
Ott	968,29	87,43
Nov	2.149,43	198,47
Dic	3.857,77	369,16
Gen	3.653,18	348,65
Feb	2.930,07	277,86
Mar	2.425,66	225,60
Apr	637,22	55,38
TOT.	16.621,62	1.562,54

Caso 2:

ventilazione meccanica, $n = 0,79 \text{ h}^{-1}$
rendimento del recuperatore $\eta = 0,9$
portata fissa ($k = 1$)

Si riportano i risultati in Tabella 4-37 per una più veloce comprensione.

Soluzione	$Q_{h,tr}$	$Q_{h,ve}$	Incidenza
	MJ	MJ	
VN ($n = 0,79$)	16621,62	15625,42	94%
VMC ($n = 0,79 \eta = 0,9 k = 1$)	16621,62	1562,54	9%

Tabella 4-37 - Incidenze percentuali dello scambio per ventilazione rispetto allo scambio per trasmissione per le due soluzioni impiantistiche ipotizzate

4.9 Certificazioni energetiche

Si riportano in questo paragrafo le certificazioni energetiche per i tre appartamenti studiati precedentemente, nello stato di fatto e nel caso di intervento di riqualificazione totale (ipotesi n°3). Ad oggi la valutazione in Emilia Romagna è effettuata sul valore di EP_{tot} , costituito da due addendi (non si valutano i contributi estivi e per illuminazione):

$$EP_{tot} = EP_i + EP_{acs} \quad \left[\frac{kWh}{m^2 \text{ anno}} \right]$$

dove:

EP_{tot} = energia primaria totale

EP_i = energia primaria per riscaldamento invernale

EP_{acs} = energia primaria per la produzione di acqua calda sanitaria

A differenti fasce di valori di EP_{tot} corrispondono diverse “classi energetiche” riportate in Figura 4-25.

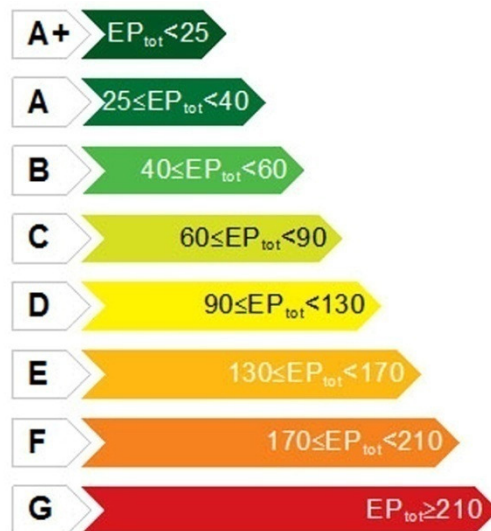


Figura 4-25 - Classi energetiche in Emilia Romagna

4.9.1 Calcolo di EP_i

L'indice di energia primaria per riscaldamento invernale è ricavato a partire dai fabbisogni di energia calcolati con la norma UNI EN ISO 13790:2008 integrandoli con il rendimento globale dell'impianto (secondo UNI TS 11300-2) che tiene conto del rendimento di emissione, di distribuzione e di regolazione. Il rendimento globale stagionale è assunto pari a $\eta_g = 0,682$ nell'ipotesi dello stato di fatto e $\eta_g = 0,704$ in seguito alle modifiche apportate all'impianto, come indicato nel paragrafo 4.6.2. (Brandimarti, 2013)

Il valore di EP_i è quindi così calcolato:

$$EP_i = \frac{Q_{h,nd,tot}}{\eta_g S_u} \quad \left[\frac{kWh}{m^2 anno} \right]$$

dove:

$Q_{h,nd,tot}$ = fabbisogno totale di energia termica per l'intero periodo di riscaldamento
[kWh]

η_g = rendimento globale dell'impianto [adim.]

S_u = superficie utile della zona termica considerata [m^2]

Il D.Lgs 192/2005 indica dei limiti al valore di EP_i in base ai gradi giorno e alla forma dell'edificio, secondo il rapporto Superficie/Volume.

4.9.2 Calcolo di EP_{acs}

L'indice di energia primaria per la produzione di acqua calda sanitaria (d'ora in poi indicata con la sigla ACS) è calcolato partendo dai fabbisogni termici secondo quanto riportato dalla norma UNI TS 11300-2.

$$Q_{H,w} = \rho \cdot c \cdot V_w \cdot (\theta_{er} - \theta_0) \cdot G$$

dove:

$Q_{H,w}$ = fabbisogno termico utile di acs [Wh]

ρ = massa volumica dell'acqua [kg/m³]

c = calore specifico dell'acqua, pari a 1,162 [Wh/kg °C]

V_w = volume dell'acqua richiesta durante il periodo di calcolo [m³/G]

θ_{er} = temperatura di erogazione dell'acqua [°C]

θ_0 = temperatura di ingresso dell'acqua fredda sanitaria [°C]

I volumi di acqua calda sanitaria sono riferiti convenzionalmente ad una temperatura di erogazione di 40 °C e ad una temperatura di ingresso di 15°C. Il salto termico è quindi pari a 25 K. Il volume di acqua è dato da:

$$V_w = a \times N_u \quad [l/G]$$

dove:

a = fabbisogno giornaliero specifico [l/Gm²]

N_u = parametro che per le abitazioni corrisponde al valore della superficie utile [m²]

Il valore di a è ricavabile dalla Tabella 4-38 nella quale sono indicati anche i fabbisogni di energia termica utile basati sulla differenza di temperatura convenzionale pari a 25 K.

Fabbisogni	Calcolo in base al valore di S_u per unità immobiliare [m ²]			Valore medio riferito a $S_u = 80 \text{ m}^2$
	≤50	51- 200	>200	
a	1,8	$4,514 \times S_u^{-0,2356}$	1,3	1,6
Fabbisogno equivalente di energia termica utile [Wh/G m ²]	52,3	$131,22 \times S_u^{-0,2356}$	37,7	46,7
Fabbisogno equivalente di energia termica utile [kWh/(m ² × anno)]	19,09	$47,9 \times S_u^{-0,2356}$	13,8	17,05

Tabella 4-38 - Valori di a per le abitazioni (tratta da UNI TS 11300-2:2008)

Ricavato il fabbisogno termico utile per acs, è possibile ricavare l'energia primaria tenendo in considerazione i rendimenti dell'impianto.

L'energia termica in ingresso al sottosistema di erogazione è pari a:

$$Q_{w,er} = \frac{Q_{H,w}}{\eta_{w,er}} \quad [Wh]$$

dove:

$\eta_{w,er}$ = rendimento di erogazione posto convenzionalmente pari a 0,95

L'energia termica in ingresso al sottosistema di distribuzione è pari a:

$$Q_{w,d} = Q_{w,er} \cdot (1 + f_{l,w,d}) \quad [Wh]$$

dove:

$f_{l,w,d}$ = coefficiente di perdita, posto pari a 0,5

Non si considerano perdite recuperate per la natura stessa del sottosistema di distribuzione della rete di teleriscaldamento.

L'energia primaria per acqua calda sanitaria è quindi calcolato come:

$$Q_{p,w} = \frac{Q_{w,d}}{\eta_{gn}} \quad [Wh]$$

dove:

η_{gn} = rendimento di generazione, pari a 0,796 (Brandimarti, 2013)

L'indice di energia primaria per la produzione di ACS è dato da:

$$EP_{acs} = \frac{Q_{p,w}}{S_u} \quad \left[\frac{kWh}{m^2 anno} \right]$$

Si riportano i calcoli effettuati per la valutazione dell'indice EPacs in Tabella 4-39

	gennaio	febbraio	marzo	aprile	maggio	giugno	luglio	agosto	settembre	ottobre	novembre	dicembre
giorni	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31
$Q_{H,w}$	137,46	124,15	137,46	133,02	137,46	133,02	137,46	137,46	133,02	137,46	133,02	137,46
$Q_{w,er}$	144,69	130,69	144,69	140,02	144,69	140,02	144,69	144,69	140,02	144,69	140,02	144,69
$Q_{w,d}$	217,03	196,03	217,03	210,03	217,03	210,03	217,03	217,03	210,03	217,03	210,03	217,03
$Q_{p,w}$	272,52	246,15	272,52	263,73	272,52	263,73	272,52	272,52	263,73	272,52	263,73	272,52

Tabella 4-39 - Calcolo dei fabbisogni per ACS per appartamento 1

Dai calcoli effettuati risulta $Q_{p,w,tot} = 3.208,70$ kWh per cui si ottiene

$$EP_{acs} = \frac{3.208,70}{100} = 32,09 \quad \left[\frac{kWh}{m^2 anno} \right]$$

4.9.3 Appartamento 1 piano primo

4.9.3.1 Stato di fatto

La norma UNI TS 11300-1:2008 indica l'utilizzo di un tasso di ricambio di aria pari a $n = 0,3 \text{ h}^{-1}$. In Tabella 4-40 si riportano i risultati forniti dal software MC4 utili per la valutazione dell'indice EP_i .

Scambio termico totale in regime continuo							
Centrale termica: CT / Unità immobiliare: appartamento 1.3 / Zona: zona riscaldata							
Mese	$Q_{H,tr}$ [MJ]	$Q_{H,ve}$ [MJ]	Q_{int} [MJ]	Q_{sol} [MJ]	γ_H	η_H	$Q_{H,nd}$ [MJ]
Ott	4.107,96	333,31	577,39	1.314,19	0,43	0,88	2.767,73
Nov	9.211,99	756,59	1.018,92	1.590,49	0,26	0,95	7.497,97
Dic	16.808,36	1.407,25	1.052,89	1.342,16	0,13	0,98	15.858,57
Gen	15.897,20	1.329,07	1.052,89	1.402,85	0,14	0,98	14.815,65
Feb	12.712,79	1.059,22	950,99	2.015,13	0,22	0,96	10.919,01
Mar	10.430,22	859,99	1.052,89	2.963,65	0,36	0,91	7.625,21
Apr	2.657,57	211,11	509,46	1.751,97	0,79	0,74	1.196,61

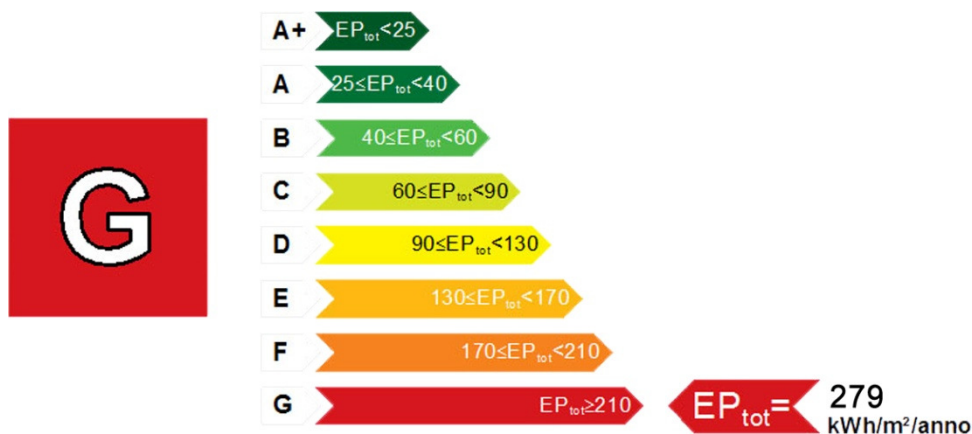
Tabella 4-40 - Valutazioni di $Q_{h,nd}$ per appartamento 1 piano primo nello stato di fatto

Risulta quindi $Q_{H,nd,tot} = 60.680,75 \text{ MJ} = 16.855,76 \text{ kWh}$. L'indice di energia primaria per il riscaldamento invernale è pari a:

$$EP_i = \frac{16.855,76}{0,682 \cdot 100} = 247,15 \left[\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2 \text{ anno}} \right]$$

mentre quello totale

$$EP_{tot} = EP_i + EP_{acs} = 247,15 + 32,09 = 279 \left[\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2 \text{ anno}} \right] \quad (\text{classe energetica G})$$



4.9.3.2 Stato di progetto (ipotesi di intervento n°3)

Il tasso di ricambio orario è pari a $n = 0,79 \text{ h}^{-1}$, il sistema di ventilazione è meccanico con efficienza $\eta = 0,9$, e portata costante ($k = 1$). In Tabella 4-41 si riportano i risultati forniti dal software MC4 utili per la valutazione dell'indice EP_i .

Scambio termico totale in regime continuo							
Centrale termica: CT / Unità immobiliare: appartamento 1.3 / Zona: zona riscaldata							
Mese	$Q_{H,tr}$ [MJ]	$Q_{H,ve}$ [MJ]	Q_{int} [MJ]	Q_{sol} [MJ]	γ_H	η_H	$Q_{H,nd}$ [MJ]
Ott	886,81	87,43	574,73	1.027,79	1,64	0,59	30,70
Nov	2.001,41	198,47	1.014,22	1.251,45	1,03	0,83	330,59
Dic	3.689,07	369,16	1.048,03	1.054,75	0,52	0,98	1.990,70
Gen	3.486,45	348,65	1.048,03	1.103,60	0,56	0,98	1.733,28
Feb	2.783,03	277,86	946,61	1.581,02	0,83	0,91	770,25
Mar	2.270,74	225,60	1.048,03	2.319,09	1,35	0,69	163,67
Apr	567,42	55,38	507,11	1.371,71	3,02	0,33	1,39

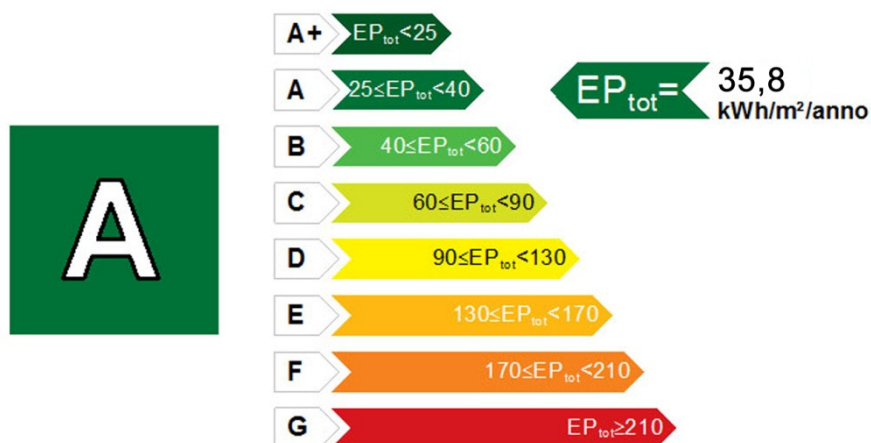
Tabella 4-41 - Valutazioni di $Q_{h,nd}$ per appartamento 1 piano primo nello stato di progetto

Risulta quindi $Q_{H,nd,tot} = 5.020,58 \text{ MJ} = 1.394,61 \text{ kWh}$. L'indice di energia primaria per il riscaldamento invernale è pari a:

$$EP_i = \frac{1.394,61}{0,704 \cdot 100} = 19,8 \quad \left[\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2 \text{ anno}} \right]$$

mentre quello totale (considerando che in questo tipo di riqualificazione è richiesto che il 50% dell'energia per acs sia coperta da fonti energetiche rinnovabili)

$$EP_{tot} = EP_i + EP_{acs} = 19,8 + 32,09 \cdot 0,5 = 35,8 \quad \left[\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2 \text{ anno}} \right] \quad (\text{classe energetica A})$$



4.9.4 Appartamento 1 piano quarto

4.9.4.1 Stato di fatto

La norma UNI TS 11300-1:2008 indica l'utilizzo di un tasso di ricambio di aria pari a $n = 0,3 \text{ h}^{-1}$. In Tabella 4-42 si riportano i risultati forniti dal software MC4 utili per la valutazione dell'indice EP_i .

Scambio termico totale in regime continuo							
Centrale termica: CT / Unità immobiliare: appartamento 4.3 / Zona: zona riscaldata							
Mese	$Q_{H,tr}$ [MJ]	$Q_{H,ve}$ [MJ]	Q_{int} [MJ]	Q_{sol} [MJ]	γ_H	η_H	$Q_{H,nd}$ [MJ]
Ott	2.441,10	333,31	579,20	1.319,51	0,68	0,84	1.186,09
Nov	5.428,31	756,59	1.022,11	1.596,05	0,42	0,93	3.746,64
Dic	9.770,71	1.407,25	1.056,18	1.346,59	0,22	0,98	8.814,51
Gen	9.250,53	1.329,07	1.056,18	1.407,82	0,23	0,98	8.163,72
Feb	7.415,63	1.059,22	953,97	2.023,14	0,35	0,95	5.637,91
Mar	6.129,43	859,99	1.056,18	2.978,36	0,58	0,88	3.449,46
Apr	1.601,80	211,11	511,06	1.762,20	1,25	0,63	375,56

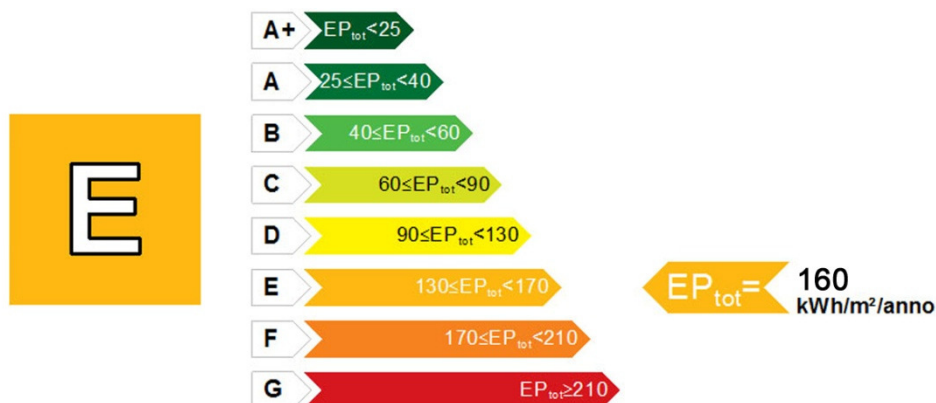
Tabella 4-42 - Valutazioni di $Q_{H,nd}$ per appartamento 1 piano quarto nello stato di fatto

Risulta quindi $Q_{H,nd,tot} = 31.373,89 \text{ MJ} = 8714,97 \text{ kWh}$. L'indice di energia primaria per il riscaldamento invernale è pari a:

$$EP_i = \frac{8714,97}{0,682 \cdot 100} = 127,8 \quad \left[\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2 \text{ anno}} \right]$$

mentre quello totale

$$EP_{tot} = EP_i + EP_{acs} = 127,8 + 32,09 = 160 \quad \left[\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2 \text{ anno}} \right] \quad (\text{classe energetica E})$$



4.9.4.2 Stato di progetto (ipotesi di intervento n°3)

Il tasso di ricambio orario è pari a $n = 0,79 \text{ h}^{-1}$, il sistema di ventilazione è meccanico con efficienza $\eta = 0,9$, e portata costante ($k = 1$). In Tabella 4-43 si riportano i risultati forniti dal software MC4 utili per la valutazione dell'indice EP_i .

Scambio termico totale in regime continuo							
Centrale termica: CT / Unità immobiliare: appartamento 4.3 / Zona: zona riscaldata							
Mese	$Q_{H,tr}$ [MJ]	$Q_{H,ve}$ [MJ]	Q_{int} [MJ]	Q_{sol} [MJ]	γ_H	η_H	$Q_{H,nd}$ [MJ]
Ott	605,03	87,43	575,56	1.029,93	2,32	0,43	1,32
Nov	1.361,78	198,47	1.015,69	1.253,68	1,45	0,67	40,72
Dic	2.499,37	369,16	1.049,55	1.056,53	0,73	0,96	839,08
Gen	2.362,85	348,65	1.049,55	1.105,59	0,79	0,95	669,09
Feb	1.887,56	277,86	947,98	1.584,24	1,17	0,79	154,41
Mar	1.543,70	225,60	1.049,55	2.324,99	1,91	0,52	10,64
Apr	388,95	55,38	507,85	1.375,81	4,24	0,24	0,02

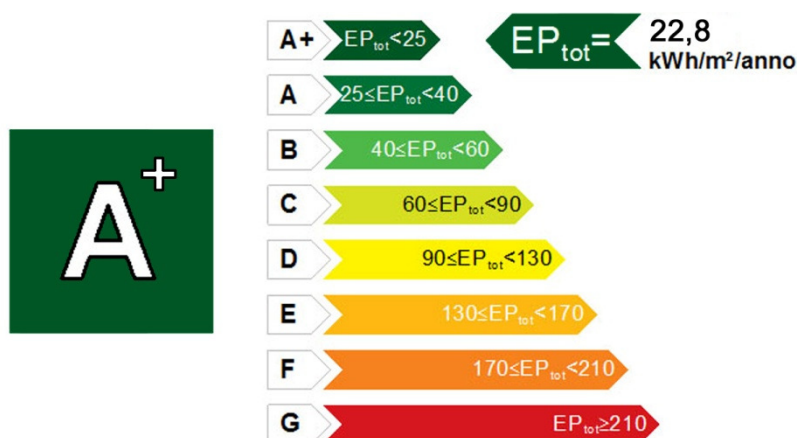
Tabella 4-43 - Valutazioni di $Q_{h,nd}$ per appartamento 1 piano quarto nello stato di progetto

Risulta quindi $Q_{H,nd,tot} = 1.715,28 \text{ MJ} = 476,47 \text{ kWh}$. L'indice di energia primaria per il riscaldamento invernale è pari a:

$$EP_i = \frac{476,47}{0,704 \cdot 100} = 6,8 \quad \left[\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2 \text{ anno}} \right]$$

mentre quello totale (considerando che in questo tipo di riqualificazione è richiesto che il 50% dell'energia per acs sia coperta da fonti energetiche rinnovabili)

$$EP_{tot} = EP_i + EP_{acs} = 6,8 + 32,09 / 2 = 22,8 \quad \left[\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2 \text{ anno}} \right] \quad (\text{classe energetica A}^+)$$



4.9.5 Appartamento 1 piano ottavo

4.9.5.1 Stato di fatto

La norma UNI TS 11300-1:2008 indica l'utilizzo di un tasso di ricambio di aria pari a $n = 0,3 \text{ h}^{-1}$. In Tabella 4-44 si riportano i risultati forniti dal software MC4 utili per la valutazione dell'indice EP_i .

Scambio termico totale in regime continuo							
Centrale termica: CT / Unità immobiliare: appartamento 8.3 / Zona: zona riscaldata							
Mese	$Q_{H,tr}$ [MJ]	$Q_{H,ve}$ [MJ]	Q_{int} [MJ]	Q_{sol} [MJ]	γ_H	η_H	$Q_{H,nd}$ [MJ]
Ott	4.933,25	333,31	577,06	1.936,43	0,48	0,86	3.109,15
Nov	10.832,47	756,59	1.018,34	2.258,47	0,28	0,94	8.522,94
Dic	19.092,27	1.407,25	1.052,29	1.876,12	0,14	0,98	17.630,20
Gen	18.104,93	1.329,07	1.052,29	1.988,89	0,16	0,98	16.464,87
Feb	14.569,26	1.059,22	950,45	2.944,37	0,25	0,95	11.937,53
Mar	12.180,89	859,99	1.052,29	4.539,21	0,43	0,88	8.129,64
Apr	3.304,91	211,11	509,17	2.767,85	0,93	0,68	1.282,51

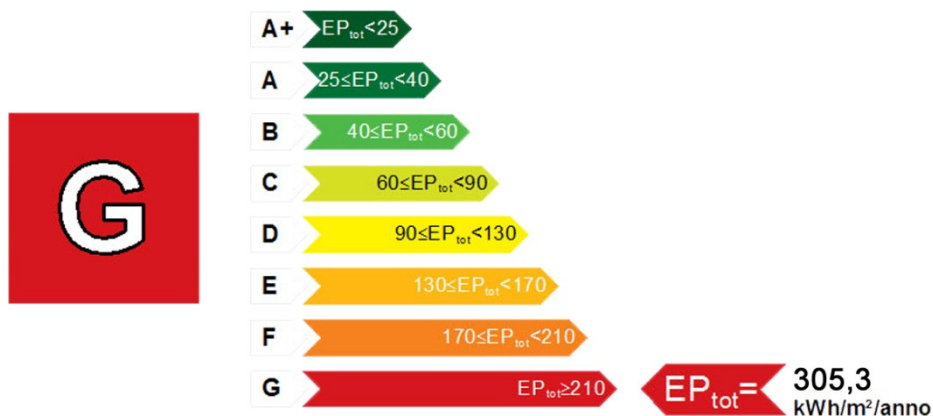
Tabella 4-44 - Valutazioni di $Q_{h,nd}$ per appartamento 1 piano ottavo nello stato di fatto

Risulta quindi $Q_{H,nd,tot} = 67.076,84 \text{ MJ} = 18632,46 \text{ kWh}$. L'indice di energia primaria per il riscaldamento invernale è pari a:

$$EP_i = \frac{18632,46}{0,682 \cdot 100} = 273,2 \left[\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2 \text{anno}} \right]$$

mentre quello totale

$$EP_{tot} = EP_i + EP_{acs} = 273,2 + 32,09 = 305,3 \left[\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2 \text{anno}} \right] \quad (\text{classe energetica G})$$



4.9.5.2 Stato di progetto (ipotesi di intervento n°3)

Il tasso di ricambio orario è pari a $n = 0,79 \text{ h}^{-1}$, il sistema di ventilazione è meccanico con efficienza $\eta = 0,9$, e portata costante ($k = 1$). In Tabella 4-45 si riportano i risultati forniti dal software MC4 utili per la valutazione dell'indice EP_i .

Scambio termico totale in regime continuo							
Centrale termica: CT / Unità immobiliare: appartamento 8.3 / Zona: zona riscaldata							
Mese	$Q_{H,tr}$ [MJ]	$Q_{H,ve}$ [MJ]	Q_{int} [MJ]	Q_{sol} [MJ]	γ_H	η_H	$Q_{H,nd}$ [MJ]
Ott	968,29	87,43	574,69	1.117,93	1,60	0,60	37,05
Nov	2.149,43	198,47	1.014,16	1.348,04	1,01	0,83	376,28
Dic	3.857,77	369,16	1.047,97	1.131,87	0,52	0,98	2.083,27
Gen	3.653,18	348,65	1.047,97	1.188,33	0,56	0,98	1.816,92
Feb	2.930,07	277,86	946,55	1.715,60	0,83	0,90	800,39
Mar	2.425,66	225,60	1.047,97	2.547,90	1,36	0,69	171,54
Apr	637,22	55,38	507,08	1.519,53	2,93	0,34	1,82

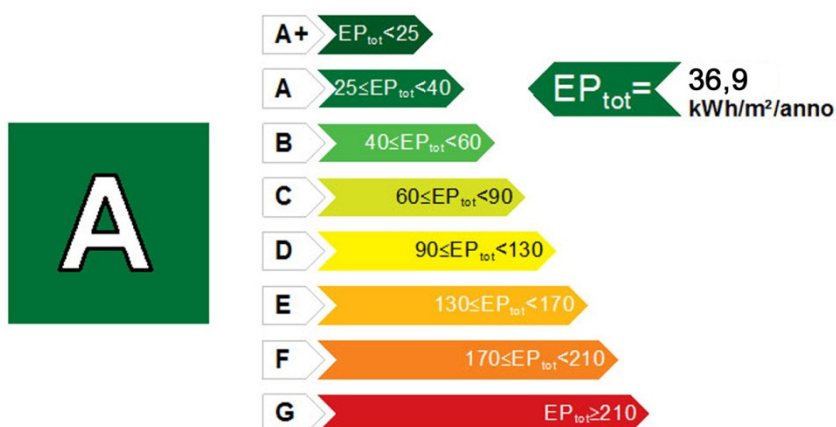
Tabella 4-45 - Valutazioni di $Q_{h,nd}$ per appartamento 1 piano ottavo nello stato di progetto

Risulta quindi $Q_{H,nd,tot} = 5.287,27 \text{ MJ} = 1.468,69 \text{ kWh}$. L'indice di energia primaria per il riscaldamento invernale è pari a:

$$EP_i = \frac{1.468,69}{0,704 \cdot 100} = 20,9 \quad \left[\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2 \text{ anno}} \right]$$

mentre quello totale (considerando che in questo tipo di riqualificazione è richiesto che il 50% dell'energia per acs sia coperta da fonti energetiche rinnovabili)

$$EP_{tot} = EP_i + EP_{acs} = 20,9 + 32,09 / 2 = 36,9 \quad \left[\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2 \text{ anno}} \right] \quad (\text{classe energetica A})$$



5 CONCLUSIONI

In questa trattazione è stato analizzato il tema della ventilazione degli ambienti *indoor*. Oggi questo è argomento di notevole interesse a causa di una serie di fattori molto importanti, di cui si è avuto modo di discutere nei capitoli precedenti:

- L'uomo trascorre la maggior parte del tempo in spazi chiusi
- L'Organizzazione Mondiale della Sanità sottolinea come molte malattie, tra cui asma e allergie, derivino dall'eccesso di umidità interna e dalla presenza di muffe
- Gli stili di vita lavorativi sono differenti rispetto al passato: non c'è più tempo per aprire adeguatamente le finestre
- L'aria interna è da 10 a 100 volte più inquinata di quella esterna (Fonte: Aldes)
- Negli ambienti i materiali di arredo e i prodotti per la pulizia possono emettere sostanze nocive
- L'infiltrazione dai serramenti, con la costruzione di edifici sempre più ermetici e a bassa permeabilità all'aria, risulta insufficiente per garantire un corretto ricambio
- Le nuove leggi in materia di risparmio energetico impongono limiti sul fabbisogno energetico di riscaldamento, in parte dovuto ai processi di ventilazione

Nel capitolo terzo sono stati analizzati i due sistemi di ventilazione possibili ad oggi in campo residenziale: la ventilazione naturale e la ventilazione meccanica controllata (VMC) applicati poi ad un edificio caso di studio nel capitolo successivo.

In particolare i due sistemi sono stati posti a confronto nel calcolo dei fabbisogni energetici e nelle incidenze rispetto al termine legato allo scambio termico per trasmissione. In Figura 5-1 si riporta un grafico riassuntivo per la ventilazione legata all'infiltrazione e all'apertura delle finestre (qui erroneamente denominata ventilazione naturale).

Sono stati studiati cinque valori rappresentativi di tasso di ricambio orario:

- $0,1 \text{ h}^{-1}$ - assenza dell'utente, ricambio dovuto a infiltrazioni

- $0,3 \text{ h}^{-1}$ - valore guida per la certificazione energetica nel caso di ventilazione naturale, secondo la UNI TS 11300-1 e in linea con un comportamento oculato da parte dell'utente nell'apertura delle finestre oltre all'infiltrazione
- $0,5 \text{ h}^{-1}$ - valore di progetto standard secondo le normative italiane attuali
- $0,79 \text{ h}^{-1}$ - valore di progetto ricavato secondo le normative di riferimento europee sul tema della ventilazione
- 1 h^{-1} - valore di ricambio orario stimato per l'apertura delle finestre non controllata (Raisa, et al., 2010)

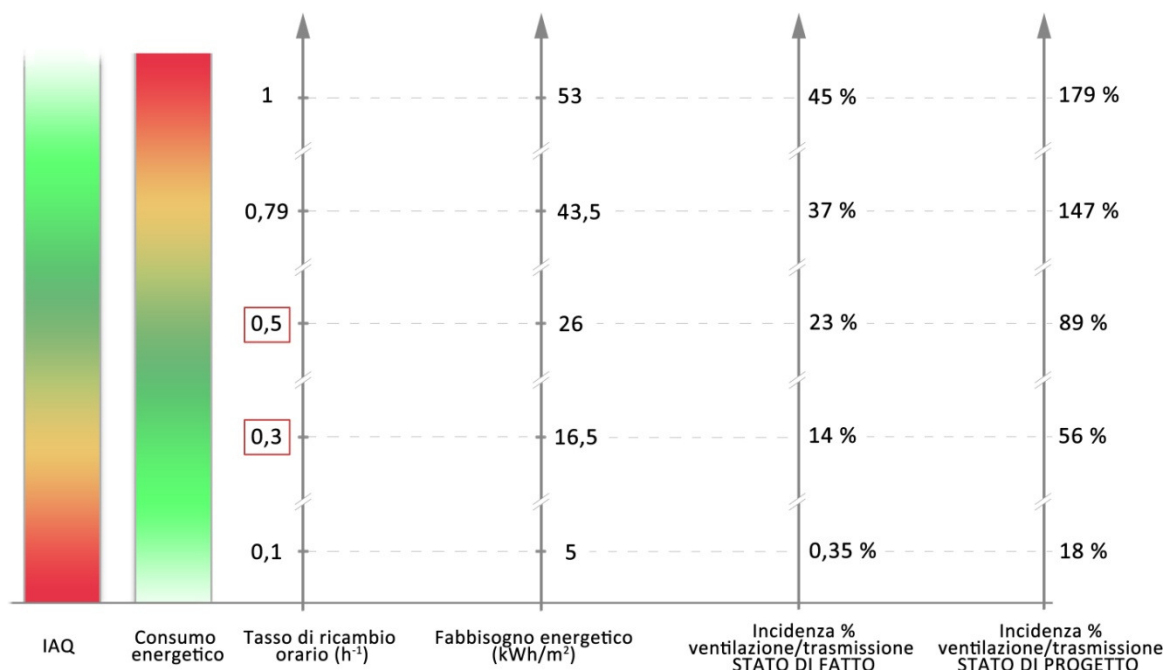


Figura 5-1 – Grafico riassuntivo per aerazione e infiltrazione

Dal grafico è molto semplice dedurre l'inversa proporzionalità esistente tra qualità dell'aria interna e consumo energetico: all'aumentare del tasso di ricambio migliora l'IAQ ma peggiora il fabbisogno energetico per la ventilazione. Nelle ultime due colonne sono rappresentate le incidenze percentuali tra il fabbisogno per la ventilazione e quello per la trasmissione nei due casi estremi studiati nel capitolo quarto di stato di fatto e stato di progetto (ipotesi di intervento n.3): rispetto allo stato di fatto la ventilazione incide in maniera preponderante sulle prestazioni dell'involucro nello stato di progetto, a edificio completamente isolato.

Per quanto riguarda la ventilazione meccanica è stato effettuato un analogo ragionamento: in sono riportati alcuni casi a partire da un sistema di VMC senza recupero di calore a

utilizzo di recuperatori di calore ad altissima efficienza paragonati al valore rappresentativo per la ventilazione naturale di $n = 0,3 \text{ h}^{-1}$ (colonna in colore beige). Anche qui è possibile notare come l'incidenza percentuale siano notevolmente superiore nel caso di edificio coibentato secondo l'ipotesi di intervento 3.

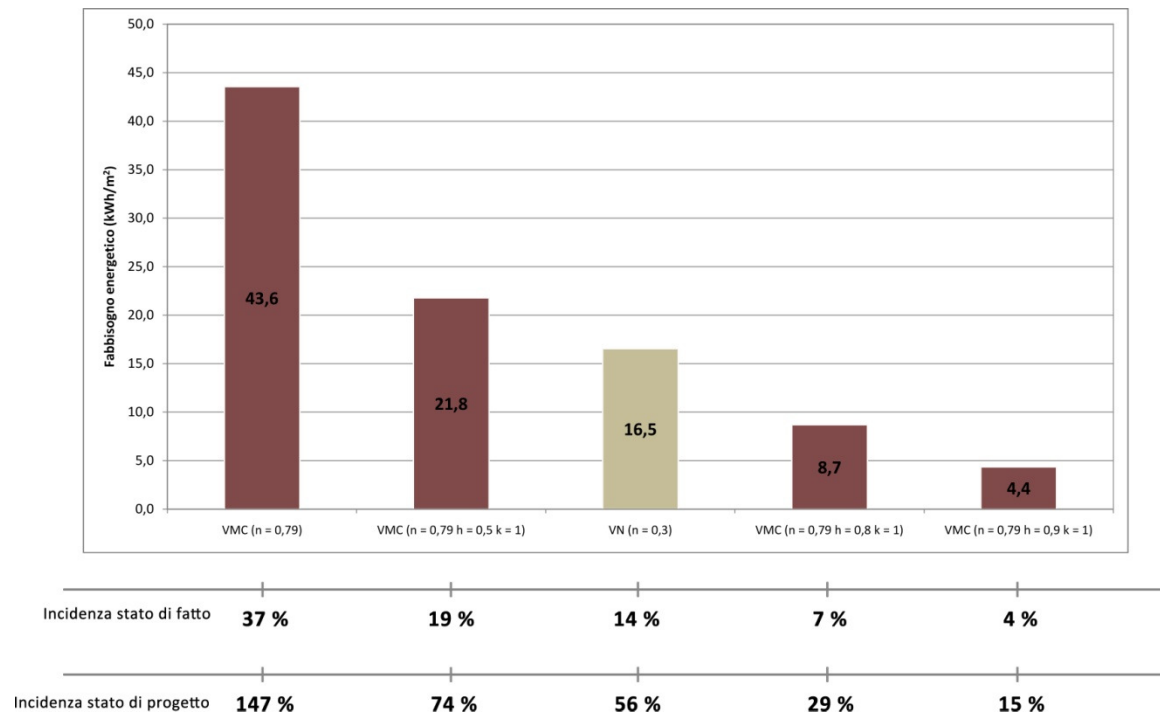


Figura 5-2 – Grafico riassuntivo per la ventilazione meccanica

La scelta progettuale è ricaduta su un impianto di ventilazione meccanica controllata a doppio flusso con recupero di calore ad altissima efficienza per diversi motivi:

- Nella ventilazione naturale (progettata come sistema e non considerando aerazione e infiltrazione) non risulta possibile avere un controllo e calcolare le portate di aria per la dipendenza del sistema dalle condizioni climatiche esterne
- La ventilazione naturale non garantisce un idoneo ricambio di aria costante e una diluizione corretta degli inquinanti per lo stesso motivo esposto sopra
- In generale l'apertura delle finestre permette l'ingresso, oltre che di rumori, soprattutto di inquinanti presenti nell'aria esterna che possono rimanere negli ambienti causando infezioni alle vie respiratorie (pollini, particolato)
- La ventilazione meccanica garantisce un elevato comfort, una elevata qualità dell'aria interna, evitando la formazione di muffe e condense, grazie al controllo e al continuo ricambio di aria negli ambienti

- La ventilazione meccanica genera minori perdite di calore, minori fabbisogni energetici e di conseguenza minori costi per il riscaldamento.

A titolo di esempio si confronti il fabbisogno energetico per la ventilazione naturale in Figura 5-1 corrispondente al valore di progetto $n = 0,79 \text{ h}^{-1}$ e quello di Figura 5-2 per lo stesso valore ottenuto però con un sistema di VMC con recupero di calore ad elevata efficienza: il secondo fabbisogno è ben dieci volte inferiore al primo.

Questa osservazione deve essere validata da un vantaggio di tipo economico (riscontrato quello energetico) nella realizzazione dell'impianto di VMC. Senza considerare l'investimento oneroso per la coibentazione e sostituzione infissi e della struttura del cavedio tecnico, da analisi di mercato risulta, per l'impianto semicentralizzato in questione, una incidenza ad appartamento intorno ai 5000 €, che per un appartamento di 100 m^2 , corrisponde a 50 €/m^2 .

Il costo di un kWh di energia termica per il riscaldamento può essere ricavato dal prezzo del combustibile C_{comb} utilizzato nella attuale centrale di teleriscaldamento (olio combustibile btz):

$$\text{costo kWh} = \frac{C_{\text{comb}}}{PCI} \cdot \frac{1}{\eta_g}$$

dove:

C_{comb} = costo del combustibile = 0,56 €/kg (Min13)

PCI = potere calorifico inferiore del combustibile = 11,42 kWh/kg

η_g = rendimento globale dell'impianto = 0,704 (Brandimarti, 2013)

da cui risulta un prezzo di 0,07 €/kWh.

A partire da questo dato è possibile valutare il tempo di ritorno semplice (*simple payback period*) dell'investimento, tenendo conto degli incentivi statali per la riqualificazione energetica nei quali ricadono anche i sistemi di VMC. L'agevolazione per la riqualificazione energetica consiste nel riconoscimento di detrazioni d'imposta Irpef nella misura del 55% delle spese sostenute, da ripartire in rate annuali di pari importo.

Il confronto è visibile in Figura 5-3 nei quali sono riportati il caso di stato di fatto (aerazione e infiltrazione non controllate) e lo stato di progetto.

	kWh/m^2	$€/m^2$
VENTILAZIONE NATURALE $n = 1$	53	3,7
VENTILAZIONE MECCANICA $n = 0,79 \eta = 0,9 k = 1$	4,4	0,3

Figura 5-3 – Fabbisogni energetici e costi per la situazione stato di fatto e quella di progetto

Il risparmio netto è di $3,4 €/m^2$ e tenendo conto delle agevolazioni del 55% che portano il costo dell'impianto da $50 €/m^2$ a $22,5 €/m^2$ il tempo di ritorno dell'investimento (si trascura il costo di manutenzione difficilmente quantificabile) si aggira intorno ai sei anni e mezzo. In questo valore vanno comunque presi in considerazione anche i vantaggi legati ad eventuali spese legali in caso di controversie per la presenza di muffe e condense in edifici mal ventilati.

Risulta quindi un investimento sicuramente vantaggioso tenendo conto soprattutto dei benefici ottenibili in termini di IAQ, comfort e salute: purtroppo però gli ultimi due indici non sono quantificabili economicamente.

Bibliografia e sitografia

- Arpa Emilia Romagna. 2013.** *La qualità dell'aria in Emilia Romagna.* 2013.
- Artusi, A. 2000.** Acoustics Research Group, DIENCA. *Università di Bologna.* [Online] 2000. [Riportato: 25 Aprile 2013.] <http://acustica.ing.unibo.it/Courses/FTA/iaq.pdf>.
- ASHRAE. 2009.** *Handbook-Fundamentals.* Atlanta : ASHRAE, 2009.
- Baggio, P., Moro, L. e Romagnoni, P. 2009.** Umidità degli ambienti interni. *CDA.* Maggio 2009, 5, p. 42-46.
- Barbieri, D., Pietrafesa, M. e Rizzo, G. 1996.** *Qualità dell'aria interna e requisiti di ventilazione. Classificazione degli inquinanti, riferimenti normativi, metodi di calcolo.* Reggio Calabria : Istituto di Ingegneria Civile ed Energetica, 1996.
- Bignami, Luigi. 2013.** Focus.it. [Online] 2 Maggio 2013. [Riportato: 18 Giugno 2013.] <http://blog.focus.it/effetto-terra/2013/05/02/anidride-carbonica-in-atmosfera-oltre-ogni-limite/>.
- Brandimarti, V. 2013.** Tesi di Laurea in Ingegneria Edile-Architettura, Università di Bologna. *Diagnosi e riqualificazione energetica nell'edilizia economico-popolare: il caso di studio di un edificio del quartiere PEEP di Corticella.* 2013.
- Calza, F. 2005.** *Manuale degli impianti termici e idrici.* II. Milano : Tecniche nuove, 2005. p. 6-39/40. Vol. 1.
- Clausen, G. 2004.** Ventilation filters and indoor air quality: a review of research from the International Centre for Indoor Environment and Energy. *Indoor Air.* 2004, 14, p. 202-207.
- De Santoli, Livio e Mariotti, Matteo. 2011.** *La ventilazione naturale. Il moto naturale dell'aria per il controllo delle condizioni ambientali.* Palermo : Dario Faccovio, 2011.
- Emmerich, J.S., W.S., Dols e Axley, J.W. 2001.** *Natural ventilation review and plan for design and analysis tools.* NIST. 2001. report 6781.
- European Commission. 2005.** *Critical appraisal of the setting and implementation of indoor exposure limits.* Bruxelles : Joint Research Centre, 2005.
- Gallizio, A. 1994.** *Impianti sanitari.* Ottava edizione. Trento : HOEPLI, 1994.
- ISAAC. 2006.** Corso formazione continua - Inquinamento indoor. *SUPSI - Scuola Universitaria Professionale della Svizzera Italiana.* [Online] 2006. [Riportato: 25 Aprile 2013.] <http://www2.isaac.supsi.ch/>.

- Kovesi, T., et al. 2007.** Indoor air quality and the risk of lower respiratory tract infections in young Canadian Inuit children. *CMAJ*. 17 Luglio 2007, Vol. 177, 2, p. 155-160.
- Lenntech. 2013.** Lenntech BV. [Online] 2013. [Riportato: 26 Marzo 2013.] <http://www.lenntech.it/anidride-carbonica.htm>.
- Magrini, Ing. Anna. 2011.** Facoltà di Ingegneria Pavia. [Online] 2011. [Riportato: 25 Luglio 2013.] http://www-3.unipv.it/ingegneria/copisteria_virtuale/magrini/fisica_tecnica/FT19-2011_comfort-IAQ.pdf.
- Ministero della Salute. 2001.** *Linee guida per la tutela e la promozione della salute negli ambienti confinati*. 2001.
- Ministero dello Sviluppo Economico. *Statistiche dell'energia*. [Online] [Riportato: 7 Dicembre 2013.] <http://dgerm.sviluppoeconomico.gov.it/dgerm/bphitalia.asp?txtAnno=2013&txtMese=12&txtGiorno=2>.
- Moro, L., Baggio, P. e Romagnoni, P. 2009.** Comfort degli ambienti interni. *CDA*. Aprile 2009, 4, p. 24-28.
- Oie, L., et al. 1999.** Ventilation in homes and bronchial obstruction in young children. *Epidemiology*. 1999, Vol. 10, 3, p. 294-299.
- Olesen, B.W. 2012.** Ventilation and indoor air quality. *The REHVA European HVAC Journal*. 2012, Vol. 49, 4.
- Oxygen, Pro.** Earth's CO2 Home Page. *CO2 now*. [Online] [Riportato: 10 10 2013.] <http://co2now.org/>.
- Pandit, GG, A., Srivasatava e Mohan Rao, AM. 2001.** Monitoring of indoor volatile organic compounds and polycyclic aromatic hydrocarbons arising from kerosene cooking fuel. *Science of the total Environment*. 2001, 279, p. 159-165.
- Raisa, Valentina, Schiavon, Stefano e Zecchin, Roberto. 2010.** *Teoria e tecnica della ventilazione*. Milano : Editoriale Delfino, 2010.
- Sciurpi, Fabio.** *Università degli studi di Firenze - Facoltà di Architettura*. [Online] [Riportato: 25 Giugno 2013.] http://web.taed.unifi.it/fisica_tecnica/Sciurpi/2-IAQ.pdf.
- Singer, BC, Hodgson, AT e Nazaroff, WW. 2003.** Gas-phase organics in environmental tobacco smoke: 2. Exposure-relevant emission factors and indirect exposures from habitual smoking. *Atmospheric Environment*. 2003, 37.

- Swami, M.V. e Chandra, S. 1988.** Correlations for pressure distribution on buildings and calculation of natural ventilation airflow. *ASHRAE Transactions*. 1988, Vol. 94, 1, p. 243-266.
- TenWolde, A. 1994.** Ventilation, humidity and condensation in manufactured houses during winter. *Ashrae Transactions*. 1994, Vol. 100, p. 103-115.
- WHO . 2006.** *WHO Air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen and sulfur dioxide*. Copenhagen : s.n., 2006.
- WHO EUROPE 2009.** *Dampness and moulds*. Copenhagen : World Health Organization, .
- WHO Europe. 2006.** *Air quality guidelines - global update 2005*. Copenhagen : s.n., 2006.
- . **2000.** *Air Quality Guidelines for Europe*. Copenhagen : s.n., 2000. p. 215.
- . **2010.** *WHO guidelines for indoor air quality: selected pollutants*. Copenhagen : s.n., 2010.