

ALMA MATER STUDIORUM- UNIVERSITA' DI BOLOGNA
CAMPUS DI RAVENNA
CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA DEI PROCESSI E DEI SISTEMI EDILIZI

*Strategie per il miglioramento della qualità dell'aria indoor
negli edifici scolastici. Applicazione a un caso-studio.*

Tesi di laurea in
Tecnologia del recupero edilizio

Relatore
Prof. Ernesto Antonini

Presentata da
Caterina Mirone

Correlatore
Prof. Fausto Barbolini

Sessione Unica Anno Accademico 2020/2021

L'uomo trascorre la maggior parte del tempo in luoghi confinati come abitazioni, uffici o scuole ed è quindi di fondamentale importanza assicurare la qualità della vita all'interno degli ambienti chiusi. Uno dei fattori che concorre alla definizione di ambiente sano è la qualità dell'aria indoor, aspetto ampiamente discusso e che ha assunto particolare rilevanza in questi ultimi due anni a causa della pandemia di Sars Covid 2019. Soprattutto in ambiente scolastico il rischio di contagio è alto per la presenza prolungata di un numero elevato di persone (studenti, professori e personale) nello stesso ambiente ed è quindi necessario assicurare un adeguato livello di sicurezza tramite una corretta e costante areazione dei locali.

La tesi ha come obiettivo la valutazione di possibili soluzioni volte al miglioramento della qualità dell'aria in ambiente scolastico applicando le nozioni apprese tramite ricerche bibliografiche ad un caso studio reale.

La fotografia dell'attuale patrimonio italiano di edilizia scolastica caratterizza la parte iniziale dell'elaborato e ne descrive le principali criticità: i consumi energetici molto elevati, lo stato di conservazione degli edifici e la qualità della vita all'interno delle aule.

Quest'ultimo parametro è valutato tramite il benessere termoigrometrico per la cui definizione concorrono vari fattori, tra cui la salubrità dell'aria. Negli ambienti confinati infatti, l'aria che viene respirata è carica di agenti inquinanti con concentrazioni pari anche a cinque volte quelle esterne. Principalmente gli inquinanti che si possono trovare sono i VOC (Composti Organici Volatili), il particolato atmosferico e l'anidride carbonica.

Per garantire che i livelli di concentrazione di inquinanti siano al di sotto dei valori limite prescritti dalle apposite normative è necessario assicurare adeguati ricambi d'aria mediante tre possibili sistemi di ventilazione: naturale, meccanica o ibrida. Quindi la parte centrale dell'elaborato è dedicata alla caratterizzazione di queste tre soluzioni; tra tutte risalta la ventilazione meccanica controllata, l'unica tecnologia in grado di garantire adeguati ricambi d'aria e la salubrità della stessa tramite appositi filtri.

A complemento della parte teorica è presente un'applicazione progettuale relativa alla scuola elementare Il Gelso di Ponte Pietra (Cesena). Dopo avere studiato lo stato di fatto dell'edificio scolastico, tramite un'analisi energetica vengono determinate le dispersioni dovute alla ventilazione e i possibili fattori di discomfort per gli occupanti. Vengono quindi elaborate due strategie progettuali, che interessano, ove possibile, solo l'impianto di

ventilazione, al fine di consentire il rientro totale a scuola post pandemia in tempi brevi. Gli interventi proposti puntano rispettivamente: il primo, a garantire in tempi brevi le portate di ricambio sufficienti e con risorse economiche limitate, mentre il secondo prevede la soluzione migliore in termini di qualità dell'aria a discapito di tempi e maggiori costi di intervento. Dal confronto delle strategie si deduce che non vi è una soluzione che in assoluto prevarica sull'altra, ma che la scelta dipende da una serie di variabili da analizzare di caso in caso.

Indice

1.L'edilizia scolastica in Italia: consistenza del parco e prestazioni energetiche	1
1.1.Cenni storici.....	2
1.2.Inquadramento.....	5
1.3.Il consumo energetico degli edifici scolastici	14
1.4.Definizione di benessere termoigrometrico e qualità dell'aria.....	18
1.5.Il Decreto Ministeriale 18-12-1975.....	28
1.6.Le Linee Guida MIUR del 2013.....	41
2.La qualità dell'aria all'interno degli edifici scolastici	42
2.1.Possibili soluzioni per garantire l'adeguata salubrità dell'aria	43
2.1.1. <i>La ventilazione</i>	47
2.1.2. <i>La ventilazione naturale</i>	49
2.1.3. <i>La ventilazione meccanica controllata</i>	53
2.1.4. <i>La ventilazione ibrida</i>	60
2.2.Metodi di progettazione per la qualità dell'aria	62
2.3.L'influenza della ventilazione sulla dispersione energetica di un edificio	68
2.4.Installazione di sistemi di ventilazione meccanica: analisi di alcuni interventi campione.....	73
3.Il caso studio	78
3.1.Localizzazione e analisi ambientale.....	79
3.2.Stato di fatto	83
3.2.1. <i>Caratteristiche generali dell'edificio scolastico</i>	83
3.2.2 <i>Aspetti tecnici</i>	86
3.3.Calcolo della prestazione energetica dell'edificio.....	93
3.4.Analisi delle criticità allo stato di fatto.....	100
3.5.Determinazione della portata di ricambio d'aria.....	103
3.6.Ipotesi di due strategie di intervento	106
3.6.1. <i>Analisi della strategia 1</i>	108
3.6.2. <i>Analisi della strategia 2</i>	116
3.7.Confronto delle due strategie	121
3.8.Considerazioni finali ed esito dell'analisi.....	127
Conclusioni	129
Riferimenti bibliografici	131

Bibliografia.....	132
Fonti normative	135
Sitografia	136
Ringraziamenti	138

1. L'edilizia scolastica in Italia: consistenza del parco e prestazioni energetiche

1.1. Cenni storici

La storia dell'edilizia scolastica italiana risulta molto articolata e copre un arco temporale che parte dall'Unità d'Italia e arriva fino ai giorni nostri. Infatti, considerando che nel 1861 la percentuale di analfabetismo tra la popolazione raggiungeva circa il 74%, lo Stato tramite la Legge Casati¹ decise di sostituire la Chiesa, finora detentrica del monopolio, nel garantire il diritto-dovere all'istruzione². Prima del 900 la scuola era considerata come uno spazio di apprendimento passivo. Le aule, che arrivavano a contenere anche cento alunni, erano caratterizzate sia da notevoli dimensioni superficiali che da elevate altezze per motivi igienici e di aereazione. La cattedra era in posizione rialzata rispetto agli studenti, tuttavia le dimensioni consistenti degli spazi provocavano difficoltà di comprensione dovuta ad alti tempi di riverberazione. Nei primi edifici appositamente costruiti per ospitare scuole lo schema di distribuzione ricorrente è quello di un corridoio centrale, che ha anche funzione di spazio di ricreazione al coperto, con aule distribuite ai suoi lati. Successivamente per sfruttare al meglio l'illuminazione naturale le aule vengono disposte su un'unica fila. Il perimetro delle scuole sancisce un confine marcato con il territorio circostante³. A partire dal 1900, con l'inizio di una fase di sperimentazione pedagogica, viene modificato il rapporto tra alunni e professore. Cambia quindi anche il ruolo dell'aula all'interno della scuola, non più associata a un luogo di apprendimento passivo ma a un ambiente che deve stimolare gli alunni ad una partecipazione attiva. Quindi la scuola diviene un aggregato di ambienti diversi e educativi, ognuno progettato per una specifica funzione. Dato che il rapido sviluppo demografico ha causato problemi sanitari per mancanza di adeguate infrastrutture, cresce l'attenzione al tema della salubrità. Tuttavia, queste teorie pedagogiche saranno in un primo momento applicate a un numero limitato di casi. Rimane quindi la struttura a blocco tipica dell'800, con le articolazioni a L a U o a E, che consentono di delimitare nettamente i confini dello spazio scolastico con l'esterno⁴. Sono del 1925 le Linee guida sulle nuove costruzioni scolastiche, che devono avere dalle 10 alle 30 aule, servizi igienici adeguati e palestre

¹ La Legge Casati è in realtà l'atto di nascita del sistema scolastico italiano ed è anche noto come Regio D.Lgs. 13 novembre 1859 n.3725 del Regno di Sardegna, in vigore dal 1860 e poi esteso all'Italia unificata.

² Calone, E, a cura di, (2014), *Edilizia scolastica: riqualificazione, messa a norma, procedure*, Wolters Kluwer Italia, Milanofiori-Assago, p. 1

³ Fondazione Giovanni Agnelli (2020), *Rapporto sull'edilizia scolastica*, Editori Laterza & Figli Spa, Bari-Roma, pp. 54-59

⁴ Ivi, nota 3, pp. 60-67

con spogliatoi data l'attenzione riposta sulla forma fisica. Tratto distintivo dell'epoca fascista è la monumentalità delle strutture, alcune delle quali sono state delle vere e proprie operazioni a scala urbana in grado di riplasmare interi quartieri. Inoltre, si assiste ad un cambiamento nella conformazione delle strutture grazie ad un rapporto di fruizione più continuo tra esterno ed interno, che quindi ha determinato la scelta di impianti a padiglione o a pettine per favorire l'illuminazione di tutti gli ambienti e segnare un confine netto tra la scuola e l'esterno.⁵ Nel secondo dopoguerra, lo spazio scolastico inizia ad essere concepito come un unico organismo e non come una serie di spazi funzionali aggregati. L'ideazione della struttura è affidata non solo al progettista ma anche ad altri soggetti pubblici nell'ottica di esprimere orientamenti e preferenze. Uno degli schemi di progettazione più ricorrente vedeva un ambiente comune centrale di distribuzione con aule disposte intorno a cui si potevano aggiungere unità complementari come laboratori, spazi per insegnamenti speciali o uffici. I due elementi che fino ad ora erano stati fondamentali nella progettazione degli edifici scolastici perdono la loro centralità, l'aula diventa un aggregato di un sistema più complesso, il corridoio è oggetto di un ripensamento più grande che lo vuole del tutto eliminato perché ricorda la clinica, il carcere e la caserma. Queste intenzioni troveranno maggiore applicazione nell'epoca successiva, senza mai però arrivare ad eliminare del tutto il modello aula/corridoio. Inoltre, a partire dagli anni Cinquanta inizia un processo di progressiva apertura delle scuole verso le città, questo perché alcuni spazi come l'aula magna o le biblioteche vengono considerati utilizzabili anche dai cittadini che abitano il quartiere⁶. Gli anni Sessanta vedono una applicazione maggiore delle teorie sviluppate in precedenza, anche dovuta al fatto che viene istituita la scuola media unica; tematica centrale di questi anni è portare le scuole su tutto il territorio nazionale, da ciò deriva una ricerca di soluzioni costruttive ripetibili. Continua il processo di apertura delle scuole verso la città, iniziato dagli anni Cinquanta e cresce l'interesse per il rapporto tra scuole e contesto urbano; infatti, l'edificio scolastico ha sempre più una funzione di centro civico per il quartiere circostante nel ruolo, per esempio, di auditorium per concerti, rappresentazioni teatrali, biblioteca. Dagli anni Settanta in poi, caratterizzati da un arresto della crescita demografica, si ferma anche il periodo della grande produzione e si riprende uno stile di progettazione più mirata a

⁵ Ivi, nota 3, pp. 68-75

⁶ Ivi, nota 3, pp. 76-81

valutare caso per caso. Gli edifici di questi anni si caratterizzano per insiemi di cortili e altezze ridotte e si afferma un modello sempre più decentrato di gestione dell'edilizia scolastica⁷. Solo dal 2000 si inizierà a costruire dei veri e propri paesaggi educativi in cui ogni elemento ha un ruolo formativo per bambini e ragazzi. I punti chiave di questo tipo di progettazione sono l'integrazione dell'edificio scolastico con il territorio circostante, la flessibilità degli ambienti realizzata tramite porte o pareti scorrevoli e lo studio degli arredi fondamentali per la progettazione degli spazi⁸.

⁷ Ivi, nota 3, pp. 82-89

⁸ Ivi, nota 3, pp. 90-97

1.2. Inquadramento

Il settore dell'edilizia scolastica italiano risulta composto di 53.313 strutture, di cui il 23,6% sono scuole paritarie, mentre i restanti 40.749 edifici, pari al 76,4 %, ospitano scuole statali⁹.

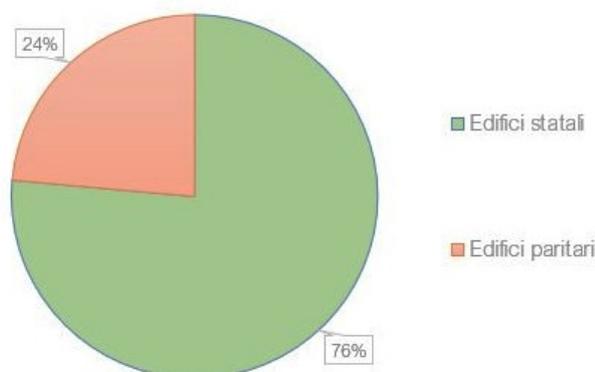


Figura 1: Edilizia scolastica pubblica e privata [fonte: mia elaborazione sui dati MIUR in nota 9]

Grazie ai dati forniti dall'AES¹⁰ (Anagrafe dell'Edilizia Scolastica) riferiti all'anno 2018/2019 è possibile avere un quadro complessivo del patrimonio esistente statale che mostra che il 96% degli edifici risultano attivi, ossia ospitano una qualche forma di attività scolastica. La restante parte rappresenta quelli dismessi, in costruzione o in ristrutturazione.

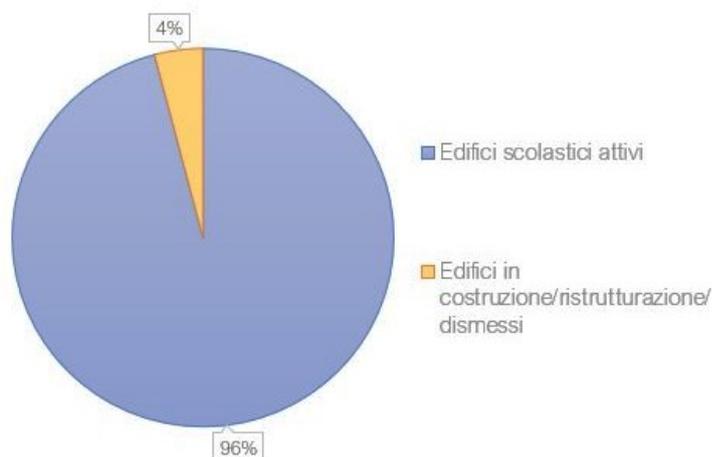


Figura 2: Percentuale di edifici attivi [fonte: mia elaborazione sui dati AES 2018/2019]

⁹ Ministero dell'Istruzione - Ufficio Gestione Patrimonio Informativo e Statistica (2019) - *Focus "Principali dati della scuola - Avvio Anno Scolastico 2019/2020"*, disponibile al link <https://www.miur.gov.it/documents/20182/0/Principali+dati+della+scuola+-+avvio+anno+scolastico+2019-2020.pdf/5c4e6cc5-5df1-7bb1-2131-884daf008088?version=1.0&t=1570015597058>, consultato il 15/06/2021

¹⁰ La legge 23 del 1996 ha previsto la realizzazione dell'AES come strumento conoscitivo per la programmazione degli interventi nel settore dell'edilizia scolastica. A causa dei diversi sistemi di catalogazione dei dati e di avanzamento regionale solo a partire dal 2015, il sistema è stato reso disponibile e consultabile dal MIUR.

Dall'anagrafe sono escluse le Province autonome di Bolzano e Trento e la Regione Valle D'Aosta.

Nella figura 3, presente nel Rapporto del Ministero dell'Istruzione, dell'Università e della Ricerca (MIUR), è indicato il numero di edifici scolastici presenti in ciascuna regione italiana. Il dato che risalta maggiormente è quello relativo alla Lombardia se consideriamo il totale regionale, l'Italia settentrionale se valutiamo l'area geografica. Questi dati non possono prescindere dalla considerazione che l'edilizia italiana ha avuto uno sviluppo diverso e non uniforme per ciascuna regione. A conferma di ciò, la figura 3 evidenzia un distacco netto dell'area settentrionale rispetto alle altre. Il principale motivo risiede nel fatto che oltre il 60% degli edifici costruiti prima del 1900 si trovano in Lombardia, Piemonte e Toscana: nei primi decenni del Novecento, infatti, così come durante l'epoca fascista, seppure ci sia stato uno sviluppo in tutto il territorio nazionale, l'Italia del Centro-Nord è quella che risulta meglio dotata. La diffusione al Sud e nelle Isole è iniziata con la costituzione della Repubblica Italiana nel 1948. A partire dagli anni Sessanta c'è stata una forte accelerazione nel settore dell'edilizia scolastica con una media di 800 edifici nuovi l'anno.

Area geografica	Regione	Totale sedi scolastiche regionali	Totale per area geografica
Italia settentrionale	Piemonte	3237	15787
	Lombardia	5267	
	Veneto	2905	
	Friuli Venezia Giulia	939	
	Liguria	1023	
	Emilia Romagna	2416	
Italia Centrale	Toscana	2591	9094
	Umbria	808	
	Marche	1299	
	Lazio	3188	
	Abruzzo	1208	
Italia Meridionale	Molise	360	10294
	Campania	4398	
	Puglia	2523	
	Basilicata	642	
	Calabria	2371	
Isole	Sicilia	4102	5574
	Sardegna	1472	
	TOTALE	40749	40749

Figura 3: Numero scuole per regione [fonte: mia elaborazione sui dati MIUR in nota 9]

Ne deriva che l'età media degli edifici scolastici sarà maggiore per le regioni settentrionali, e minore per quelle del centro-sud. Nella figura 4 è riportata regione per regione l'età media degli edifici scolastici a cui appartengono. Quasi tutte le regioni presentano un'età media del loro parco di edilizia scolastica compresa tra 47 e 56 anni, con una media su scala nazionale di 52, mentre è la Liguria ad avere l'indice più elevato (età media pari a 75 anni).

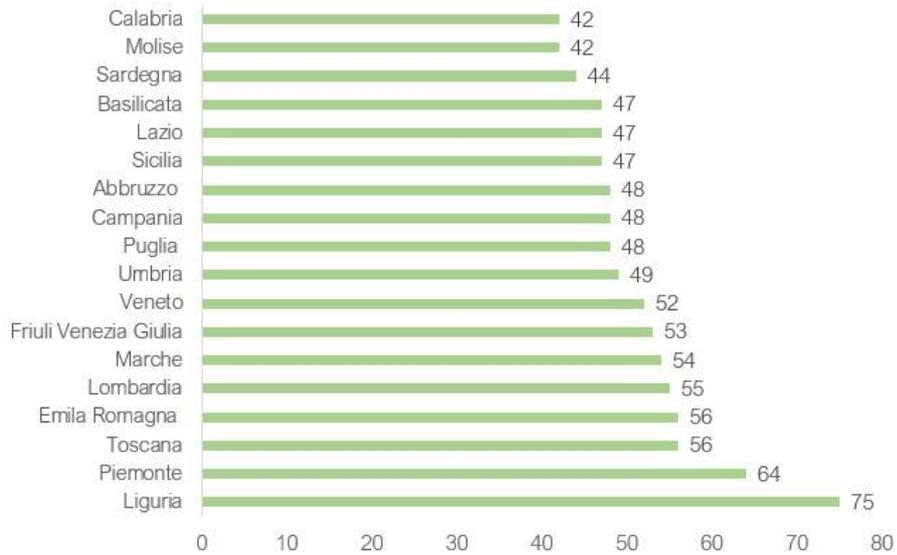


Figura 4: Età media edifici per regione [fonte: Fondazione Agnelli – Rapporto sull’edilizia scolastica]

Il grafico seguente riassume in valore percentuale la distribuzione territoriale degli edifici scolastici in Italia.

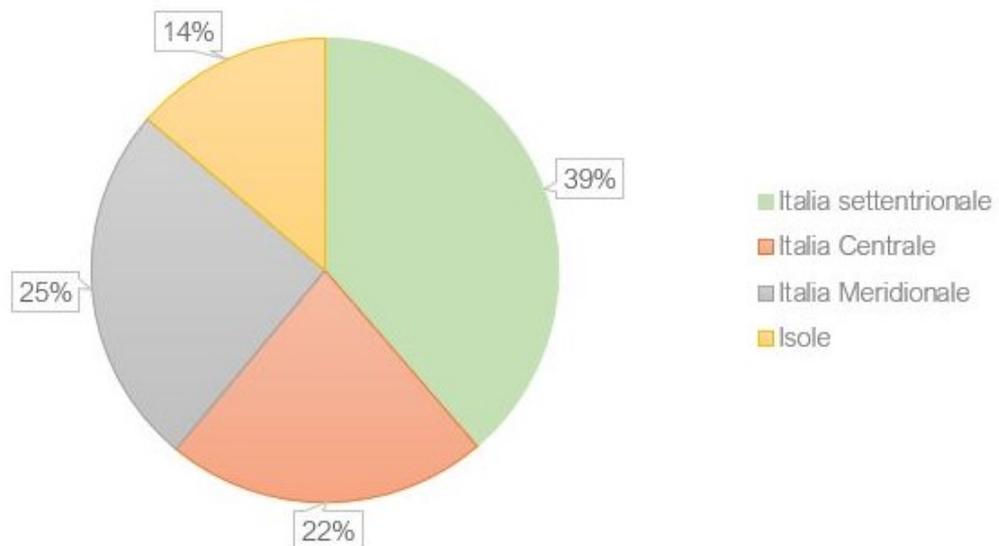


Figura 5: Distribuzione percentuale italiana di scuole [fonte: mia elaborazione sui dati MIUR in nota 9]

L'edilizia scolastica ha avuto varie fasi di sviluppo, da ciò consegue che il patrimonio italiano conta una molteplicità di tecnologie costruttive, che dipendono dal momento in cui gli edifici sono stati realizzati. In realtà i dati mostrano come non sempre sia possibile risalire all'anno esatto di costruzione: del 37% degli edifici è nota solo l'epoca approssimativa di costruzione mentre per il 4% non si hanno informazioni. Coerentemente con i dati precedenti riguardanti l'età degli edifici, la maggior parte risulta costruita dagli anni '60 in poi.

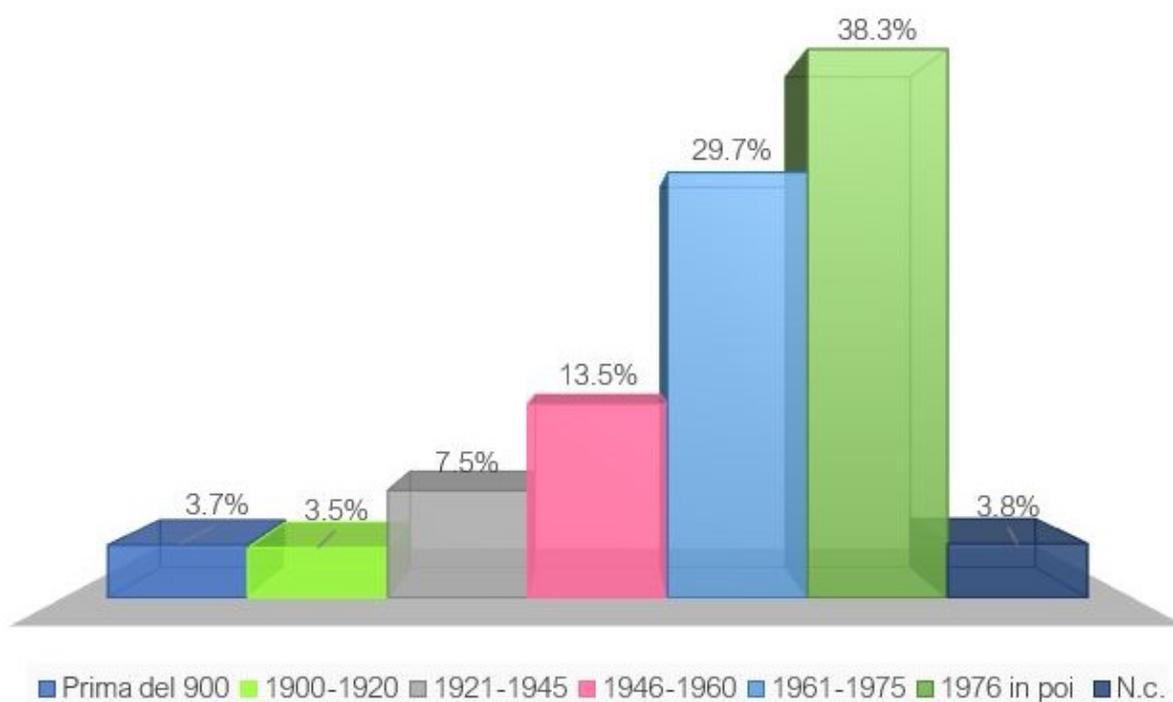


Figura 6: Percentuale di edifici per epoca di costruzione

[fonte: mia elaborazione sui dati presenti in Fondazione Agnelli – Rapporto sull'edilizia scolastica]

Strettamente legata all'epoca di edificazione è la tipologia costruttiva degli edifici. Le strutture costruite prima del 900 sono in totale 1.461, di cui solo il 30% appositamente ad uso scolastico, la restante parte ha subito adattamenti per assolvere a questa funzione. In questo caso, si tratta in larga prevalenza di edifici in muratura portante, cosa che rende difficile apportare modifiche per l'evoluzione delle esigenze didattiche.

A partire dal primo ventennio del 900 inizia la lenta diffusione della struttura a travi e pilastri in calcestruzzo armato per sostituire la muratura. La progettazione delle aule si concentra sull'illuminazione e sull'areazione degli spazi tramite aperture più grandi¹¹. Con le Linee

¹¹ Ivi, nota 3, p. 63-66

guida sulle nuove costruzioni scolastiche del 1925, gli edifici devono essere dotati di ambienti come una palestra con spogliatoi, una piscina coperta e dove possibile anche scoperta, una biblioteca, sale destinate a insegnanti e aule apposite per il disegno, il canto, l'economia domestica. I volumi sono imponenti e talvolta arricchiti da materiali pregiati per i pavimenti e i rivestimenti delle pareti¹². Dopo la Seconda Guerra Mondiale anche in Italia si iniziano ad affermare criteri che vedono la scuola come un unico organismo e non più come un insieme di ambienti funzionali aggregati¹³. Il progressivo uso del calcestruzzo armato porta ad abbandonare la muratura portante. A quest'epoca risalgono le prime sperimentazioni nel campo della prefabbricazione, che troveranno sistematica applicazione nei decenni successivi. Gli edifici realizzati in questo periodo, anche quando di buona qualità progettuale, presentano spesso modesta qualità costruttiva e uso di materiali scadenti: infatti, sono caratterizzate da pessime condizioni termiche e acustiche, che richiedono importanti interventi di miglioramento della loro efficienza energetica¹⁴.

Dal 1960, quando anche l'Italia meridionale viene investita da un processo di sviluppo dell'edilizia scolastica, la prefabbricazione viene utilizzata largamente, consentendo di realizzare i componenti strutturali in maniera industriale e di creare modelli di scuola ripetibili e adattabili a luoghi e situazioni diversi. Per gli edifici realizzati in questi anni, che sono circa 12.000, sono stati usati materiali innovativi non ancora adeguatamente rodati come i serramenti in alluminio, membrane sintetiche, plastiche, pannellature in legno composito che però hanno comportato conseguenze come scollamento di rivestimenti interni, caduta delle controsoffittature, inefficienze dei serramenti¹⁵. Con la legge n. 373 del 30 aprile 1976 vengono introdotte le norme sul contenimento del consumo energetico e si crea un dislivello tra l'alta qualità richiesta agli edifici e la realtà del patrimonio esistente, che necessita un adeguamento. La quota parte di edifici realizzata dopo il 1975 corrisponde al 40% ed è condizionata da una normativa sempre più stringente. La figura 7 mostra la ripartizione percentuale per tipologia costruttiva dell'intero parco edilizio

¹² Ivi, nota 3, pp. 68-71

¹³ Ivi, nota 3, p. 76

¹⁴ Ivi, nota 3, p. 79

¹⁵ Ivi, nota 3, p. 85

scolastico. Il totale è superiore a cento perché per alcuni edifici è stata indicata più di una tipologia di struttura portante.

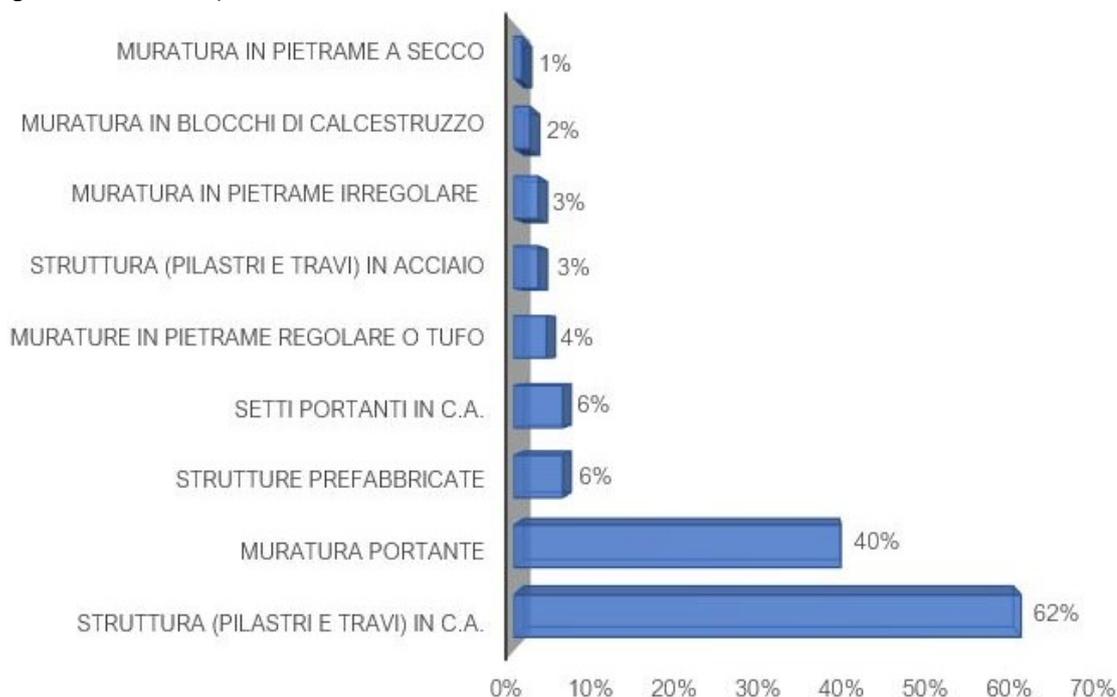


Figura 7: Percentuale per tipologia di struttura portante

[fonte: mia elaborazione sui dati presenti in Fondazione Agnelli – Rapporto sull'edilizia scolastica]

I dati registrati dall'Anagrafe ministeriale forniscono anche informazioni sullo stato di conservazione degli edifici, che quantificano il livello di degrado/efficienza delle strutture e degli impianti e attribuendo un punteggio da 1 a 6 in base al Manuale di Rilevamento del MIUR¹⁶. La tabella 1 riassume lo stato di conservazione associato a ciascun punteggio. Con riferimento a questa scala di valutazione si può avere un quadro parziale sullo stato di conservazione degli edifici scolastici. In particolare, sono riportati in tabella 2 solo gli edifici con un punteggio inferiore a 3, a cui corrispondono condizioni più gravose. I dati relativi a questa indagine non sono però connessi ad accertamenti diagnostici, ma sono basati su delle segnalazioni e devono quindi essere interpretati come campanelli di allarme, più che come riscontri documentali. Gli edifici che risultano compromessi gravemente sono circa 3.100 e costituiscono il 16,1 % del patrimonio totale, di cui la maggior parte presenta problematiche relative alla copertura.

¹⁶ MIUR, (2021) – Istruzioni per la compilazione della scheda di rilevazione del patrimonio di edilizia scolastica, disponibile al link https://www.istruzione.it/edilizia_scolastica/allegati/Manuale%20Compilazione%20Scheda%20Edificio%20Scolastico%202021.pdf, consultato il 18/06/21

Punti	Definizione	Descrizione
6	Nessun intervento richiesto.	Assenza di patologie e alterazioni nei materiali, segni di obsolescenza, elementi rotti o parzialmente danneggiati.
5	Intervento di manutenzione parziale.	Nel complesso l'edificio è efficiente ma necessita di manutenzione ordinaria, per esempio il danneggiamento dell'intonaco esterno o degli infissi.
4	Intervento di manutenzione completa.	È compromessa la funzionalità dell'edificio, ad esempio una finestra senza vetri, che compromette la tenuta termica.
3	Intervento di sostituzione o rifacimento parziale.	Gli elementi tecnici o i componenti sono danneggiati in modo grave, quindi è necessario sostituire o rifare parzialmente una struttura o un impianto.
2	Intervento di sostituzione o rifacimento completo.	Il danno è molto esteso, come il danneggiamento di un pilastro, e quindi si ha necessità di sostituire o rifare una parte dell'edificio o un impianto.
1	Necessità di installazione ex novo.	È necessario intervenire in maniera radicale sull'edificio o su parte di esso con interventi di risanamento.

Tabella 1: Valutazione dello stato di conservazione dell'edificio [fonte: vedi nota 16]

Tipologia di problema	Numero di edifici	% sul totale di edifici
Compromissione delle strutture portanti verticali	271	1.4 %
Compromissione delle strutture portanti verticali e dei solai	147	0.8%
Compromissione delle strutture portanti verticali e delle coperture	136	0.7%
Compromissione delle strutture portanti verticali, dei solai e delle coperture	388	2%
Compromissione dei solai	192	1%
Compromissione dei solai e delle coperture	182	0.9%
Compromissione delle coperture	1.794	9.3%

Tabella 2: Percentuale di edifici per tipologia di problema [fonte: Fondazione Agnelli – Rapporto sull'edilizia scolastica]

Un'altra problematica annessa alla tipologia costruttiva e all'età degli edifici è quella che investe il consumo energetico. L'attenzione crescente verso l'efficienza energetica e la sostenibilità ambientale risulta essere, infatti, una priorità per l'edilizia scolastica presente e futura.

Secondo l'anagrafe ministeriale, in circa il 59% degli edifici sono stati adottati uno o più accorgimenti per il contenimento dei consumi energetici. Di seguito vengono riportati i principali interventi e la percentuale di strutture investita per ogni tipologia, il totale è superiore a cento perché una struttura può avere adottato più accorgimenti.

Tipo di accorgimento per il consumo energetico	Percentuale
Doppi vetri o doppi serramenti	38,2%
Zonizzazione impianto termico	35,6%
Pannelli solari	26,3%
Isolamento copertura	22,5%
Isolamento pareti esterne	11,9%
Altro	5,1%

Tabella 3: Percentuale di edifici per intervento di miglioramento energetico

[fonte: Fondazione Agnelli – Rapporto sull'edilizia scolastica]

Per avere una panoramica completa sul parco di edilizia scolastica italiana se ne riporta la distribuzione per ordine e grado di istruzione. Dai dati relativi al numero di scuole per ciascun ordine e grado emergono delle caratteristiche diverse in termini di superficie complessiva e numero di piani, in funzione del fatto che a ogni tipologia di grado scolastico corrispondono le proprie attività formative.

Tipologie di scuola	N edifici	Percentuale
Scuole dell'infanzia	8358	21.40%
Scuole primarie	9377	24%
Scuole dell'infanzia e primarie	3376	8.60%
Scuole medie	4286	11%
Gradi diversi del I ciclo	6889	17.60%
TOTALE INFANZIA E I CICLO	32286	82.60%
Licei	2081	5.30%
Istituti tecnici	1491	3.80%
Istituti professionali	1663	4.30%
Ordini diversi del II ciclo	1388	3.60%
TOTALE II CICLO	6623	17.00%
Gradi e ordini diversi del I e del II ciclo	170	0.40%
TOTALE EDIFICI	39079	100.00%

Figura 7: Percentuale di edifici per tipologia di scuola [fonte: Fondazione Agnelli – Rapporto sull'edilizia scolastica]

La figura 8 riporta il numero di edifici e la percentuale corrispondente ad ogni tipologia di scuola, con gradi diversi del I ciclo si intendono gli istituti comprensivi mentre con gradi diversi del II ciclo gli istituti superiori.

Dai dati dell'Anagrafe dell'Edilizia scolastica emerge anche una correlazione tra il numero di piani di un edificio scolastico e la tipologia di scuola in esso ospitata. Tramite uno studio¹⁷ condotto su un campione di 20.000 edifici si osserva che in media al crescere del grado scolastico aumenta anche lo sviluppo verticale. Infatti, le scuole dell'infanzia e primarie sono caratterizzate da 2 o 3 piani mentre le superiori e le università da 3 o 4.

¹⁷ Dolce M & Martinelli A (A cura di), (2005) - *Inventario e vulnerabilità degli edifici pubblici e strategici dell'Italia centro-meridionale, Vol. I – Caratteristiche tipologiche degli edifici per L'Istruzione e la Sanità*, INGV/GNDT-Istituto Nazionale di geofisica e Vulcanologia / Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti, L'Aquila, disponibile al link <http://jargo.itim.mi.cnr.it/pubblicazioni/Volume1/Volume1.pdf>, consultato il 20/06/2021

1.3. Il consumo energetico degli edifici scolastici

Contrastare il cambiamento climatico è ormai una priorità a livello mondiale, con l'obiettivo di limitare il riscaldamento globale e di ridurre le emissioni dei gas serra, aumentando la quota di energia prodotta da fonti rinnovabili e promuovendo l'efficienza energetica del settore edilizio. Il *"Rapporto sullo stato globale del 2019 per edifici e costruzioni"*¹⁸ prodotto dalla *Global Alliance for building and construction* (Global Abc), evidenzia che il settore dell'edilizia è responsabile del 36% del consumo finale di energia e del 39% delle emissioni totali di biossido di carbonio a livello globale. Una parte di energia è impiegata per la produzione dei materiali da costruzione, la quota maggiore per il raffreddamento e riscaldamento degli ambienti. Di seguito si riportano le percentuali a livello mondiale di consumi di energia ed emissioni di CO₂ annue.

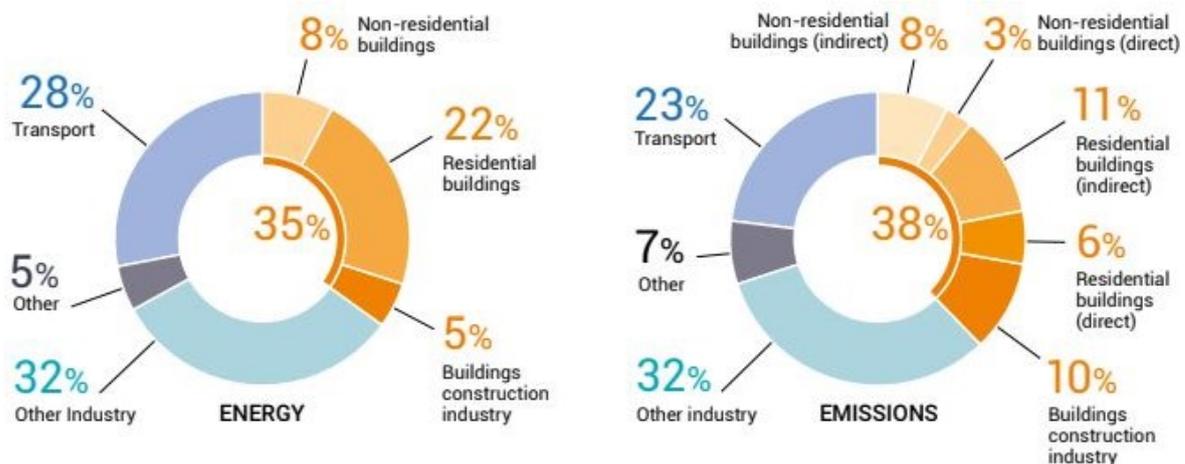


Figura 8: A sinistra consumi energetici e a destra emissioni di gas serra su scala globale [fonte: vedi nota 18]

Secondo i dati riportati dall'Agenzia Europea dell'Ambiente (AEA)¹⁹, l'Unione Europea risulta essere il terzo produttore di gas serra dopo Cina e Stati Uniti²⁰. L'obiettivo che si era posta l'Europa per il 2020 era di ridurre le emissioni di gas serra del 20% rispetto al 1990 e già nel 2018 erano diminuite del 23,3%. Oltre a stabilire i nuovi obiettivi per il 2030, cioè di ridurre le emissioni fino al 55%, la proposta della Commissione Europea riguarda anche la limitazione del riscaldamento globale sotto 1,5° C. Le emissioni di gas

¹⁸ Il Rapporto sullo stato globale per edifici e costruzioni fornisce un aggiornamento annuale sui progressi delle azioni effettuate nel settore edile per il raggiungimento dell'accordo di Parigi sui cambiamenti climatici. Il documento completo è disponibile al: https://globalabc.org/sites/default/files/inline-files/2020%20Buildings%20GSR_FULL%20REPORT.pdf, consultato il 22/06/2021

¹⁹ La AEA è un'agenzia dell'Unione Europea che si occupa di favorire lo sviluppo sostenibile e conseguire miglioramenti significativi nell'ambiente in Europa.

²⁰ I dati provengono dal dossier redatto dal Parlamento Europeo nel 2018 e aggiornato nel 2021 che riguarda le soluzioni dell'Unione Europea per contrastare i cambiamenti climatici con i relativi obiettivi.

serra in Unione Europea sono dovute per il 60% ai settori dell'edilizia, dell'agricoltura, dei rifiuti e dei trasporti escluso quello aereo e per la restante parte dall'industria e dall'aviazione. Di seguito è riportata la tabella di emissioni di gas serra per l'anno 2019²¹ di alcuni degli stati UE, da cui si può notare che l'Italia presenta uno tra i più alti tassi di emissione.

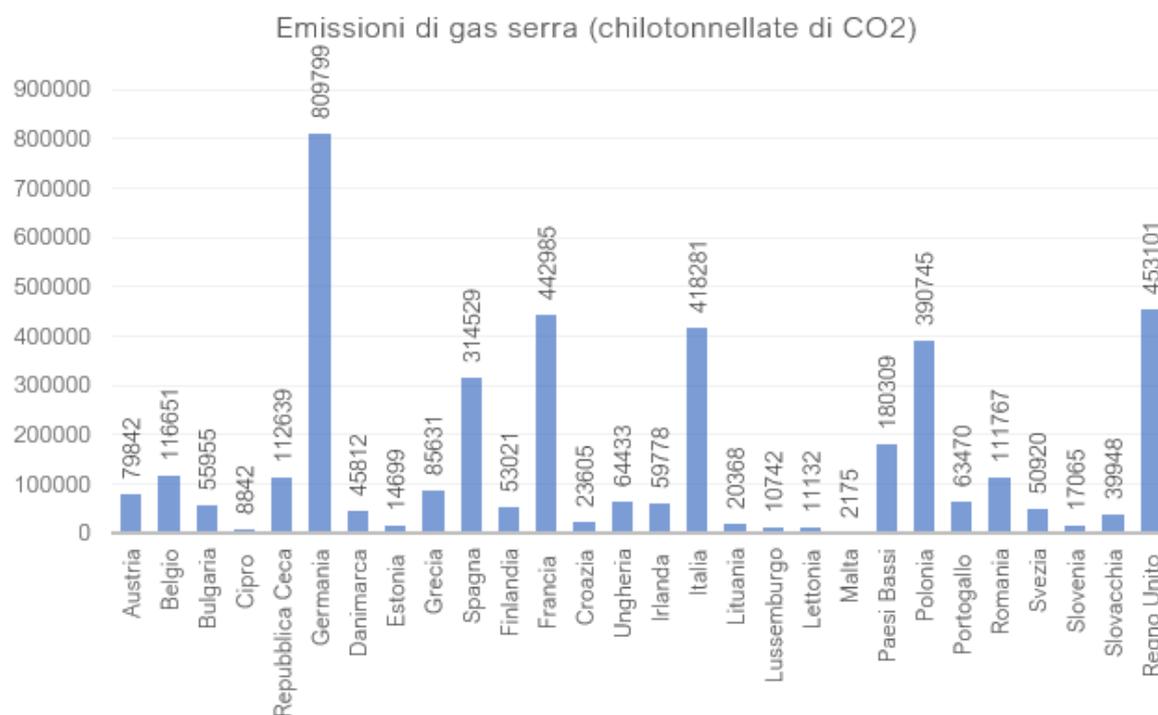


Figura 9: Emissioni di gas serra in UE nel 2019 [fonte: vedi nota 21]

In Italia le emissioni di gas serra, di cui la CO₂ costituisce da sola l'81,4% del totale, hanno subito una riduzione del 20,5% nel trentennio 1990-2018. Il grafico di seguito riportato, elaborato dall'ISPRA²², mostra le percentuali di emissioni del gas serra CO₂ per l'anno 2018 in Italia²³: la quota maggiore va attribuita al settore energetico²⁴, con una percentuale pari all' 80,5%, seguito dal settore dei processi industriali e dell'agricoltura

²¹ Il grafico e le informazioni contenute fanno riferimento alla voce del sito del Parlamento Europeo che riporta le emissioni di gas serra nell'UE per paese e settore disponibile al link <https://www.europarl.europa.eu/news/it/headlines/society/20180301STO98928/emissioni-di-gas-serra-per-paese-e-settore-infografica>, consultato il 23/06/2021

²² L'Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale è un ente pubblico di ricerca italiano, dotato di personalità giuridica di diritto pubblico, autonomia tecnica, scientifica, organizzativa, finanziaria, gestionale, amministrativa, patrimoniale e contabile.

²³ L'elaborato a cui si fa riferimento è il documento che riguarda l'andamento delle emissioni nazionali di gas serra in cui vengono analizzate le emissioni di tutti i gas serra. Nella tesi sono stati riportati i valori riguardanti solo l'anidride carbonica in quanto parametro preso a riferimento. Per il documento completo consultare: <https://www.isprambiente.gov.it/files2020/eventi/gas-serra/romano.pdf>, consultato il 23/06/2021

²⁴ Per settore energetico si intendono le emissioni dovute al settore residenziale e servizi, ai trasporti e alle industrie

che rappresentano rispettivamente l'8,1% ed il 7,1% delle emissioni totali, mentre il settore dei rifiuti contribuisce con il 4,3%.

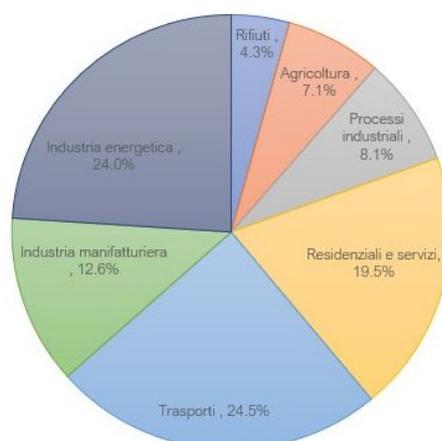


Figura 10: Emissioni di biossido di carbonio per settore in Italia [fonte: vedi nota 23]

L'edilizia scolastica, che costituisce il 15% degli edifici non residenziali, è responsabile di una quota di consumi energetici e immissione di gas serra in atmosfera. Quindi anche per l'edilizia scolastica presente e futura, una delle priorità riguarda l'efficienza energetica e la sostenibilità ambientale. In particolare, una ricerca ENEA²⁵ (RSE/2009/119)²⁶ stima i consumi termici medi, quindi per riscaldamento e produzione di acqua calda sanitaria e quelli elettrici in base alla tipologia di scuola come riportato nella Tabella 4 sottostante.

Tipologia di scuola	Consumi termici (kWh/m ² /annuo)	Consumi elettrici (kWh/m ² /annuo)
Nidi, scuole dell'infanzia e primarie	80-100	20
Secondarie I e II grado	20-65	20

Tabella 4: Consumi energetici ed elettrici annui per tipologia di scuola [fonte: vedi nota 26]

²⁵ L'Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia e lo sviluppo economico sostenibile è un ente di diritto pubblico finalizzato alla ricerca, all'innovazione tecnologica e alla prestazione di servizi nei settori dell'energia, dell'ambiente e dello sviluppo economico sostenibile.

²⁶ Report redatto da ENEA e dal Ministero dello Sviluppo Economico in collaborazione con l'Università degli studi Roma Tre con l'obiettivo di realizzare un database di dati di consumo termico ed elettrico degli edifici scolastici a livello nazionale. Per maggiori dettagli consultare: https://www.enea.it/it/Ricerca_sviluppo/documenti/ricerca-di-sistema-elettrico/governance/rse119.pdf, consultato il 23/06/21

A questi consumi sono associati dei costi elevati per il funzionamento delle strutture in questione come segnalato nella tabella di seguito, in funzione della posizione geografica, che potrebbero essere ridotti grazie ad interventi di riqualificazione energetica.

	Tipologia di consumo	Nord Valore medio, €	Centro Valore medio, €	Sud Valore medio, €
Costo medio annuo per...	Riscaldamento	8.500	5.000	2.600
	Illuminazione	5.000	5.000	5.000
	Acqua potabile	500	500	500
	Costo totale	14.000	10.500	8.100

Tabella 5: Costo medio annuo dei consumi per una scuola

[fonte: Fondazione Agnelli – Rapporto sull’edilizia scolastica]

La rilevazione dell’AES mostra che il 59% degli edifici scolastici attivi hanno adottato uno o più accorgimenti per il contenimento dei consumi di energia. Il XX rapporto “Ecosistema scuola” di Legambiente²⁷ ha raccolto dati su un campione di 6.156 edifici in 87 comuni capoluogo e circa 1,2 milioni di studenti frequentanti. Solo il 28% delle strutture risulta essere certificata energeticamente con una netta maggioranza che cade in classe F e G. In tabella 6 è riassunta la distribuzione dei 1.723 edifici scolastici italiani con certificazione energetica, suddivisi per aree geografiche.

Classe Energetica	Nazionale	Nord	Centro	Sud	Isole
A	6,3%	6%	13,8%	0,4%	0%
B	1,2%	1,7%	0%	0,4%	0,8%
C	5,3%	7,6%	3,4%	0%	1,6%
D	15%	18,6%	12,5%	3,4%	13,6%
E	16%	19,9%	16,9%	1,7%	8,8%
F	20,3%	23,3%	24,5%	5,5%	12%
G	35,9%	22,8%	28,8%	88,6%	63,2%

Tabella 6: Percentuale di edifici per classe energetica [fonte: XX rapporto “Ecosistema scuola” di Legambiente]

²⁷ Ogni anno Legambiente pubblica il rapporto “Ecosistema Scuola”, un’indagine sulla qualità dell’edilizia scolastica e dei servizi, il rapporto completo citato è disponibile al seguente indirizzo: <https://www.legambiente.it/wp-content/uploads/2021/03/Ecosistema-scuola-2021.pdf>, consultato il 23/06/2021

1.4. Definizione di benessere termoigrometrico e qualità dell'aria

È possibile definire il comfort o benessere ambientale come una condizione psicofisica di completa soddisfazione verso l'ambiente entro il quale si opera²⁸. La percezione di questa condizione dipende da vari aspetti come il benessere termico, la qualità dell'aria interna, l'acustica e il comfort visivo. Oltre a questi parametri soggettivi, su di essa incidono fattori come la costituzione fisica, il sesso, l'adattabilità, l'età, ed è per questo che gli indici di soddisfazione non arrivano mai al 100% essendo basati su valori statistici ricavati osservando un gruppo di persone quanto più numeroso possibile.

La sensazione termica non dipende solo dalla temperatura dell'ambiente in cui il soggetto si trova, ma soprattutto dalla quantità di energia che viene scambiata. Il bilancio di energia termica è influenzato sia dall'attività fisica e dall'abbigliamento sia da quattro grandezze fisiche fondamentali²⁹:

- La temperatura dell'aria;
- La temperatura media radiante definita come temperatura di un ambiente fittizio, caratterizzato da pareti aventi tutte la stessa temperatura, nel quale un soggetto scambierebbe per irraggiamento lo stesso flusso termico che scambia nell'ambiente reale in cui ogni parete ha una propria temperatura;
- La velocità dell'aria; normalmente durante la stagione fredda all'interno di un locale riscaldato non dovrebbe superare i 0,25 m/s, mentre la soglia di fastidio si aggira intorno ai 0,8 m/s ovvero quando gli oggetti leggeri iniziano a volare;
- L'umidità dell'aria.

Dal calcolo di questi parametri è possibile prevedere la sensazione termica del corpo ed esprimerla tramite due indicatori, il PMV (*Predicted Mean Vote* o voto medio previsto) e il PPD (*Percentage Predicted Dissatisfied* o percentuale prevista di insoddisfatti)³⁰. Il PMV fornisce una stima della sensazione termica espressa da un gruppo di persone relativa a un ambiente e rappresenta un valore medio della sensazione di comfort o discomfort

²⁸ Pepe, D & Rossetti, M (2016), *Progetti di scuole innovative*, Maggioli Editore, Santarcangelo di Romagna, p. 13

Raisa, V & Schiavon, S & Zecchin, R (2010), *Teoria e tecnica della ventilazione: soluzioni per l'edilizia residenziale e per il piccolo terziario*, Delfino, Milano, p. 63

²⁹ De Santoli, L & Mancini, F (2017), *La progettazione degli impianti di climatizzazione*, Maggioli, Santarcangelo di Romagna, p. 35

³⁰ Gli indicatori PMV e PPD sono definiti dalla UNI EN ISO 7730:2006-Ergonomia degli ambienti termici - Determinazione analitica e interpretazione del benessere termico mediante il calcolo degli indici PMV e PPD e dei criteri di benessere termico locale.

sentita. Il PPD invece rappresenta la percentuale di utenti che provano una percezione di disagio termico in un determinato ambiente. Le cause più comuni di disagio sono dovute a:

- L'asimmetria della temperatura radiante, a causa di superfici troppo calde o fredde;
- Le correnti d'aria, quindi un movimento eccessivo dell'aria;
- Notevole variazione della temperatura in funzione dell'altezza;
- Superfici orizzontali, pavimenti o solai, eccessivamente caldi o freddi.³¹

Un altro aspetto fondamentale da tenere in considerazione quando si analizza il benessere ambientale di un luogo confinato è la salubrità dell'aria. La IAQ (*Indoor Air Quality*) influenza in maniera notevole la salute delle persone, causando effetti indesiderati di diversa entità a seconda della tipologia di inquinante, delle concentrazioni in cui si presenta e del tempo di esposizione. In Italia si stima che ragazzi e bambini passino dalle 4 alle 8 ore al giorno all'interno degli ambienti scolastici, per almeno 10 anni. Quindi alcune delle patologie respiratorie a cui sono esposti dipendono dai livelli di concentrazione di inquinanti che si registrano in questi ambienti soprattutto CO₂ e PM₁₀.

Insufficienti tassi di ventilazione e areazione e presenza di contaminanti generati dall'involucro edilizio, dagli arredi, da prodotti vari ma anche da animali, funghi, batteri, virus e microrganismi, fanno sì che gli inquinanti negli ambienti indoor possono avere concentrazioni anche cinque volte superiori rispetto all'esterno.

I più pericolosi fra gli inquinanti *indoor* appartengono alla categoria dei Composti Organici Volatili (VOC), cioè delle molecole che evaporano facilmente dalle superfici e si disperdono non solo nell'aria, ma anche nell'acqua, in alcuni cibi o nei mobili: oggi ne sono stati identificati circa 900³². Negli ambienti confinati si rilevano tra i 50 e i 300³³ VOC, che possono derivare da fonti inquinanti tanto esterne quanto interne, come per esempio dalle normali attività metaboliche di piante ed animali, dall'utilizzo di additivi nei materiali da costruzione, dalla presenza di collanti negli arredi ma anche dai processi di combustione come il traffico veicolare o gli impianti di riscaldamento e infine da abitudini di vita

³¹ Oleotto, E & Picotti, M (2015), *La ristrutturazione delle scuole: soluzioni strutturali, impiantistiche e per il risparmio energetico*, D. Flaccovio Editore, Palermo, pp.63-64

Pepe, D & Rossetti, M (2016), *Progetti di scuole innovative*, Maggioli Editore, Santarcangelo di Romagna, pp.13-14

³² Busa, L (2020), *Progettare l'aria: Salute e salubrità negli ambienti indoor*, Maggioli Editore, Santarcangelo di Romagna, p. 15

³³ Ibidem, nota 32

quotidiane come il fumo di sigaretta, i detersivi, i profumi. Le due principali modalità di diffusione dei VOC sono per evaporazione e per capillarità³⁴, perciò la loro pericolosità non è assolutamente legata alla posizione stratigrafica del materiale che emette all'interno di un elemento costruttivo; quindi, non è detto che un materiale presente superficialmente sia più nocivo rispetto ad uno racchiuso nelle pareti. Infatti, per capillarità, un elemento che si trova all'interno della muratura, ad esempio un prodotto coibente, può emettere dei composti i quali, attraversando i vari strati o i bordi di giunzione o le fughe tra elementi, raggiungono l'ambiente interno. Il processo di evaporazione invece dipende esponenzialmente dalla temperatura, quindi al variare anche minimo di questa grandezza si ha un forte aumento della concentrazione di composti in un ambiente confinato.

Oltre ai VOC sopracitati, un altro inquinante rintracciabile negli ambienti confinati è la formaldeide presente in numerosi prodotti per la casa, nei materiali da costruzione, nel fumo di tabacco, nei prodotti per la pulizia, nelle colle o adesivi, nelle vernici e nei disinfettanti. A seconda della destinazione d'uso si può stabilire che il valore medio di concentrazione di formaldeide si aggira intorno ai 30 µg/m³ per l'edilizia residenziale e scolastica, mentre all'esterno è pari a 6 µg/m³³⁵. L'inalazione di questa molecola può causare effetti irritativi sia a breve che a lungo termine e provocare nausea, difficoltà respiratorie, reazioni allergiche e attacchi di asma.

Un altro elemento che si trova in concentrazioni elevate è il particolato PM, acronimo di "*Particulate Matter*", cioè una miscela di particelle liquide e solide che viene trasportata tramite correnti di aria nei luoghi confinati. Nonostante il particolato atmosferico sia originato quasi esclusivamente da fattori ambientali esterni, come il traffico, le sue concentrazioni indoor possono risultare anche doppie rispetto a quelle outdoor³⁶. Specialmente le nano polveri, cioè le particelle con diametro minore di 0,1 µm (PM_{0.1}), possono risultare le più dannose per la salute causando stati infiammatori e sintomatologie come asma, bronchite e riduzione della funzione polmonare. Il limite imposto dalla Direttiva del 2008³⁷ è di 20 µg/m³ ed un valore obiettivo di 25 µg/m³, da raggiungere dal

³⁴ Ivi, nota 32, p. 19

³⁵ Ivi, nota 32, pp. 21-22

³⁶ Ivi, nota 32, p. 24

³⁷ Direttiva del Parlamento Europeo e del Consiglio dell'Unione Europea 2008/50/CE del 21 maggio relativa alla qualità dell'aria ambiente e per un'aria più pulita in Europa, Allegato XIV-Obiettivo nazionale di riduzione dell'esposizione, valore-obiettivo e valore limite per il PM_{2.5}.

2020, mentre all'interno degli ambienti in inverno è stato riscontrato³⁸ un valore di 51,2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, pari quindi a più del doppio³⁹. In realtà non esiste una soglia al di sotto della quale non ci siano degli effetti, che possano essere a breve e a lungo termine, riguardanti l'apparato cardiovascolare e respiratorio. La grande problematicità è legata al fatto che il particolato atmosferico si trova quasi sempre in sospensione, all'esterno venendo continuamente rimescolato, frammentato e riaggregato attraverso l'azione dei venti locali e del traffico veicolare e al chiuso in presenza di determinate condizioni impiantistiche che permettono elevati moti convettivi. Il carico inquinante di un ambiente interno, oltre alle sostanze chimiche e al materiale particellare già descritti, può essere aggravato da una complessa miscela di potenziali allergeni. Questi trovano il loro habitat naturale all'interno degli impianti di condizionamento, nei filtri, negli umidificatori e nei condensatori, in ambienti poco areati, in cucine ricche di umidità o dove si accumula maggiormente la polvere; infine, anche gli animali possono rappresentare un vettore allergenico. Inoltre, è necessario tenere conto degli inquinanti diretti, come acari, funghi, animali, pollini, batteri e virus. È quindi importante progettare correttamente i nodi costruttivi di un edificio affinché non si creino le condizioni ideali, per esempio, per la germinazione dei funghi o inserire un impianto di ventilazione per evitare che entrino i pollini o altri inquinanti dall'esterno. Ad esempio, l'assenza di un'adeguata tenuta all'aria, determina un passaggio incontrollato di aria che in inverno può generare vapore acqueo e condensa e formazione di muffe, alcune particolarmente dannose per la salute umana.

Un altro fattore di contaminazione indoor da tenere sotto controllo è l'eventuale presenza di metalli pesanti. Nel settore edilizio si possono trovare in prevalenza materiali come l'arsenico, il piombo e il mercurio, sia sottoforma di sostanze disciolte in acqua, sia come materiale aerodisperso assieme al particolato atmosferico. L'arsenico, difficile da smaltire e potenzialmente pericoloso, è stato oggetto di regolamentazione, ma è possibile trovarne traccia ancora oggi. Il piombo, che veniva utilizzato durante gli anni 70 e 80 come materiale fonoisolante e nelle vernici, può tuttora essere presente all'interno delle vecchie

³⁸ Tra il 2004 e il 2006 è stato svolto uno studio su 61 edifici scolastici dalla Regione Toscana. Sono state misurate nelle aule le concentrazioni degli inquinanti legati al traffico veicolare, tra cui il $\text{PM}_{2.5}$. L'intero documento è disponibile al link <https://www.regione.toscana.it/documents/10180/320308/Progetto%20INDOOR/05db5b28-0192-44bc-8db7-bdb4bf322709>, consultato il 25/06/2021

³⁹ Ivi, nota 28, p.15

tubazioni; il mercurio, tossico per le persone, veniva impiegato per la produzione di smalti e vernici e per saldare le tubazioni.

Infine, un elemento altamente pericoloso è la presenza di gas radon nel sottosuolo, nell'acqua di falda o nei materiali che costituiscono l'edificio. Questo gas può giungere all'interno dei locali abitati attraverso gli ambienti a contatto con il terreno e sfruttando giunti di dilatazione, fessure e porosità dell'involucro, ma può penetrare anche tramite le tubazioni di servizio che attraversano guaine e calcestruzzi di fondazione. L'inalazione di gas radon aumenta il rischio di tumore polmonare; considerando inoltre che il principale prodotto del suo decadimento è il piombo, i soggetti sono esposti ad un duplice rischio.⁴⁰ È importante condurre un'analisi della presenza di inquinanti soprattutto per l'ambiente scolastico, dove è imposta la prolungata permanenza degli alunni in spazi chiusi. Questo al fine di garantire le condizioni minime necessarie perché gli alunni mantengano agevolmente l'attenzione, oltre che per ridurre i problemi sanitari e conseguentemente le assenze.

Uno dei principali parametri da tenere sotto controllo è la concentrazione di CO₂, che tra le 1.000 e le 1.500 ppm (parti per milione) espone gli utenti ad emicranie e perdita di concentrazione, fondamentale in un ambiente scolastico⁴¹. Se viene superata la soglia delle 2.500 ppm possono verificarsi addirittura intossicazioni o altri effetti dannosi. Prendendo come riferimento un edificio degli anni 70 senza un sistema di ventilazione meccanica controllata ma con ricambio dell'aria manuale, ed effettuando un controllo della concentrazione di CO₂ all'interno degli spazi sono stati riscontrati diversi valori di concentrazione, all'esterno 515 ppm, mentre in un'aula addirittura 2.018 ppm⁴².

Per avere un quadro più dettagliato sui livelli di alcuni inquinanti presenti nei luoghi scolastici confinati è possibile riportare i dati del progetto SEARCH (*School Environment and Respiratory Health of Children*)⁴³, condotto tra il 2010 e il 2013 e promosso dal Ministero Italiano dell'Ambiente e della tutela del Territorio e del Mare (MATTM) con lo scopo di migliorare la qualità dell'aria indoor nelle scuole e ridurre problemi respiratori acuti e cronici e le crisi allergiche. I dati riportati di seguito riguardano scuole delle regioni

⁴⁰ Ivi, nota 32, pp.18-43

⁴¹ Ivi, nota 28, p.14

⁴² Ivi, nota 28, p.15

⁴³ Documento completo al: <https://www.isprambiente.gov.it/files/progetti/qualitadellarianellescuole.pdf>, consultato il 26/06/2021

Piemonte, Lombardia, Lazio, Sicilia, Emilia-Romagna e Sardegna che hanno collaborato al progetto. Dal grafico risulta che i livelli di formaldeide sono notevolmente maggiori all'interno, essendo un materiale utilizzato per gli arredi, gli adesivi, negli indurenti e nei lucidanti. Il benzene, un composto chimico che, a temperatura ambiente e pressione atmosferica, si presenta sotto forma di liquido volatile incolore altamente infiammabile, è un costituente naturale del petrolio, ma viene sintetizzato a partire da altri composti chimici presenti nel petrolio stesso. È presente nei prodotti di cancelleria e spesso negli astucci dei bambini. Infine, anche nell'indagine condotta, risultano concentrazioni di particolato atmosferico più elevate all'interno piuttosto che all'esterno. I valori molto diversi del particolato atmosferico derivano dalla differente localizzazione delle scuole, nel progetto SEARCH circa il 25 % degli edifici si trova vicino a delle aree industriali, discariche o altre fonti di grande inquinamento esterno, e questo pone l'attenzione sull'importanza di una progettazione e pianificazione urbana maggiormente curata sotto questo aspetto.

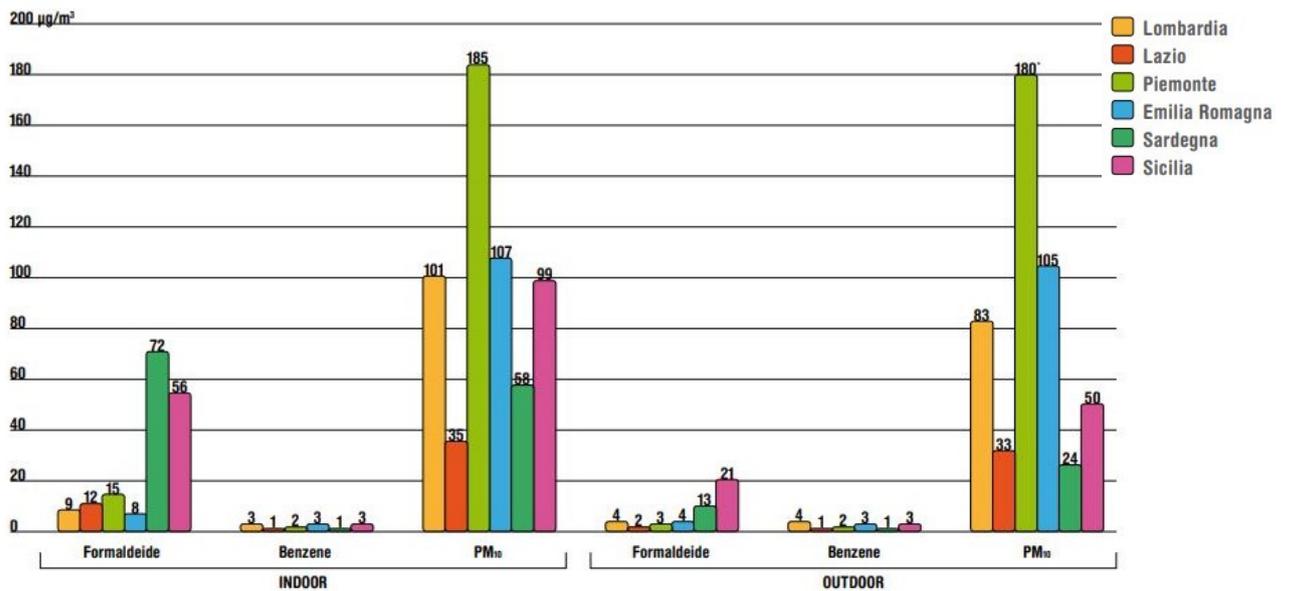


Figura 11: Livelli di inquinanti indoor e outdoor [fonte: vedi nota 43]

L'acustica riveste un ruolo molto importante per garantire il comfort interno di un edificio scolastico, dal momento che questo fattore può condizionare notevolmente lo svolgimento delle attività didattiche da parte degli insegnanti e la capacità di attenzione degli alunni.

Il comfort acustico dipende essenzialmente dai seguenti aspetti⁴⁴: la qualità acustica dell'ambiente interno, legata principalmente alle caratteristiche di assorbimento sonoro delle superfici presenti e la protezione contro i rumori provenienti da altri spazi interni o esterni, legata alle caratteristiche strutturali dei divisori (infissi, pareti e solai). Il fattore di disturbo esterno deriva dalla localizzazione della scuola in grandi centri abitati (ad esempio il traffico veicolare e aereo), mentre quello interno dal rumore proveniente da altre classi, dalle mense e dagli spazi comuni nonché dagli impianti. Per i fattori esterni, si può incrementare il potere fonoisolante degli elementi di involucro edilizio interessati. Un aspetto rilevante che incide sul comfort acustico è l'assorbimento sonoro, che è il fenomeno -controllato tramite il calcolo del tempo di riverberazione- per cui il livello di pressione sonora all'interno di un ambiente continua a persistere per alcuni secondi dopo che la sorgente viene spenta. Più precisamente, il tempo di riverberazione viene definito come il tempo impiegato dal suono a diminuire di 60 dB dal momento in cui viene spenta la sorgente⁴⁵. Se questo parametro presenta dei valori alti, all'interno del luogo confinato può verificarsi una situazione di fastidio. Una soluzione per diminuire il tempo di riverberazione di un ambiente è l'inserimento di dispositivi fonoassorbenti, che possono essere anche un elemento di riqualificazione *indoor*.

Per migliorare il comfort acustico, particolare attenzione deve essere posta alla progettazione degli impianti, sia continui che discontinui: è possibile intervenire minimizzando il più possibile il rumore della sorgente e limitando la trasmissione di vibrazioni sulle vie di propagazione, per gli impianti più rumorosi, ad esempio gli scarichi dei bagni, è essenziale silenziare le tubazioni. I livelli di rumore dipendono sia da parametri tecnici come quelli elencati in precedenza, sia dalla sensibilità e dalla soglia individuale, quindi da come un soggetto reagisce fisiologicamente al rumore⁴⁶.

⁴⁴ Oleotto, E & Picotti, M (2015), *La ristrutturazione delle scuole: soluzioni strutturali, impiantistiche e per il risparmio energetico*, D. Flaccovio Editore, Palermo, p.65

Associazione Italiana di Acustica, (2017), *Linee guida per una corretta progettazione acustica di ambienti scolastici*, disponibile al link <https://www.portaleagentifisici.it/filemanager/userfiles/rumore/documentazione/AIAebook-Linee-guida-per-una-corretta-progettazione-acustica-di-ambienti-scolastici.pdf?lg=IT>, consultato il 27/06/2021

⁴⁵ Calone, E, a cura di, (2014), *Edilizia scolastica: riqualificazione, messa a norma, procedure*, Wolters Kluwer Italia, Milanofiori-Assago, pp.139

⁴⁶ Boarin, P (2010), *Edilizia scolastica: riqualificazione energetica e ambientale: metodologie operative, requisiti, strategie ed esempi per gli interventi sul patrimonio esistente*, Edicom, Monfalcone, pp.102-105

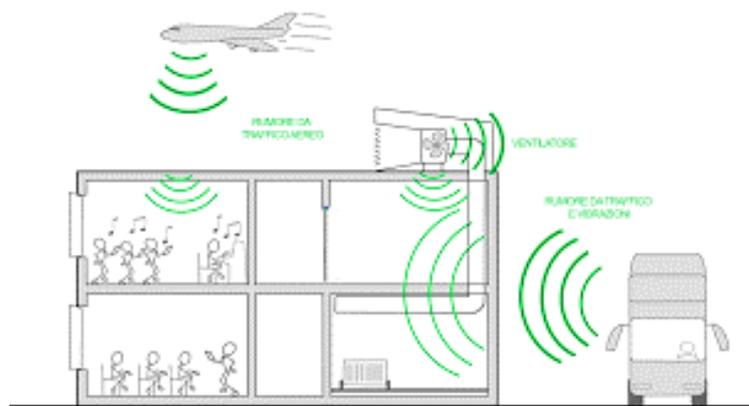


Figura 12: Fonti di rumore che incidono sul benessere acustico [fonte: vedi nota 44]

Un altro fattore molto importante per il comfort dell'ambiente scolastico è il benessere visivo, che è legato a dei parametri come l'illuminamento interno e la sua uniformità, l'abbagliamento, il contrasto e la resa cromatica. Nonostante la progettazione illuminotecnica sia molto complessa e dipenda da parametri sia oggettivi che soggettivi, si deve tenere conto di due aspetti fondamentali:

- lo sfruttamento massimo della luce naturale evitando al contempo sia problemi relativi all'abbagliamento sia al surriscaldamento dell'ambiente interno causato dall'energia termica entrante attraverso le finestre;
- la progettazione adeguata di un impianto integrativo di luce artificiale.

Considerando che la luce percepita in un ambiente confinato dipende da molti fattori come ad esempio l'orientamento, il contesto, la presenza di edifici vicini e di ostruzioni esterne, sistemi di ombreggiamento, tipologia di fonti di luce artificiale e apparecchi illuminanti, non è possibile fornire indicazioni progettuali generalizzate ma solo dei parametri di riferimento e delle linee guida. In primis è necessario valutare la localizzazione e l'orientamento ottimale dell'edificio, in funzione della località climatica in cui ci si trova. L'importanza di progettare bene l'illuminamento risiede nell'influenza che ha sullo stato d'animo e il benessere psicofisico delle persone, favorendo creatività, dinamicità e collaborazione tra i soggetti. La qualità e la quantità della luce naturale dipendono in primis dall'orientamento dell'edificio e delle aule. Tramite questo parametro è possibile valutare i guadagni solari gratuiti durante i mesi invernali che però possono causare surriscaldamento durante il periodo estivo⁴⁷. Tuttavia, la valutazione del contributo di luce

⁴⁷ Boarin, P (2010), *Edilizia scolastica: riqualificazione energetica e ambientale: metodologie operative, requisiti, strategie ed esempi per gli interventi sul patrimonio esistente*, Edicom, Monfalcone, pp.97

naturale, che risulta essere in ogni caso la sorgente migliore, è molto complicata perché dipende da fattori variabili come meteo, ora e stagione⁴⁸.

Le problematiche che presentano gli edifici scolastici sono ricorrenti e variano in base all'epoca di costruzione. Possono essere distinti in due macrosistemi: gli edifici nati prima e dopo la Seconda Guerra Mondiale. Alla prima categoria appartengono gli immobili costruiti tra la fine dell'Ottocento e gli anni Quaranta del Novecento: questi edifici sono realizzati con murature spesse in pietra o laterizio che garantiscono un buon grado di inerzia termica e la loro principale debolezza è la presenza di ampie finestre a vetro singolo con telai in legno o in ferro che hanno spesso esaurito il loro ciclo di vita utile⁴⁹. Gli edifici appartenenti alla seconda categoria, costruiti a partire dagli anni Cinquanta, risultano essere forse i più problematici da recuperare a causa della qualità dei materiali impiegati e delle tecniche costruttive adottate⁵⁰. Questi edifici non sono energeticamente efficienti perché caratterizzati da murature a doppio strato con camera e isolante scarso o inesistente, vetri semplici e solai poco coibentati; un altro fattore di dispersione è rappresentato dagli elementi radianti posizionati nelle nicchie sotto la finestra⁵¹. Ulteriore problematica relativa agli edifici di questa seconda categoria è la possibile presenza di cemento amianto, materiale economico impiegato come rivestimento di pareti verticali, intradossi di solaio o come elemento di tenuta all'acqua sulle coperture⁵². Al fine di contenere i consumi energetici per usi termici nel 1976 nasce la prima legge che regola il contenimento del consumo energetico per usi termici negli edifici⁵³. Un passo in avanti in materia è rappresentato dall'emanazione della Legge n. 10/1991⁵⁴ che, in accordo con la politica energetica della Comunità economica europea, pone anche l'attenzione sull'utilizzo delle fonti rinnovabili. Tuttavia, la legge ha avuto un'applicazione limitata e il parco di edilizia scolastica in tutto il territorio nazionale risulta lontano dagli standard qualitativi della media europea. Solo negli anni più recenti è cresciuta l'attenzione alle

⁴⁸ Antonini, E & Boeri, A (2011), *Progettare scuole sostenibili: criteri, esempi e soluzioni per l'efficienza energetica e la qualità ambientale*, EdicomEdizioni, Monfalcone, pp.189-196

Ivi, nota 46, pp.96-102

⁴⁹ Calone, E, a cura di, (2014), *Edilizia scolastica: riqualificazione, messa a norma, procedure*, Wolters Kluwer Italia, Milanofiori-Assago, p.17

⁵⁰ Ivi, nota 49, p. 18

⁵¹ Ivi, nota 49, p.18

⁵² Ivi, nota 49, p.18

⁵³ L. 30 marzo 1976, n. 373

⁵⁴ L. 9 gennaio 1991, n.10

condizioni di comfort e benessere psicofisico parallelamente alle richieste prestazionali a livello energetico⁵⁵.

⁵⁵ Ivi, nota 49, p.19

1.5. Il Decreto Ministeriale 18-12-1975

Il quadro normativo riguardante l'edilizia scolastica fa principalmente riferimento al Decreto Ministeriale del 18.12.1975 che, nonostante sia stato abrogato⁵⁶, rappresenta l'unico testo organico in materia di edilizia scolastica. Il testo contiene infatti le Norme tecniche aggiornate relative all'edilizia scolastica, compresi gli indici di funzionalità didattica, edilizia e urbanistica, da osservarsi nella esecuzione di opere di edilizia scolastica. In particolare, nel seguito ci si riferirà al paragrafo 5, relativo alle condizioni di abitabilità degli edifici che devono risultare soddisfacenti per tutta la durata d'uso prevista.

Le condizioni richiamate sono:

- Le condizioni acustiche;
- Le condizioni dell'illuminazione e del colore;
- Le condizioni termoigrometriche;
- Le condizioni di sicurezza;
- Le condizioni d'uso dei mezzi elementari o complessi necessari a stabilire i livelli di esigenze espresse nei punti precedenti;
- Le condizioni di conservazione dei livelli raggiunti nel soddisfare le esigenze di cui ai punti precedenti.

Le condizioni acustiche

I criteri generali, i metodi di misura, e i criteri di valutazione adottati fanno riferimento alla circolare 30 aprile 1966, n. 1769, parte 1a del Servizio Tecnico Centrale del Ministero dei lavori pubblici, salvo alcune prescrizioni riguardanti la particolare destinazione dell'edificio. Le misure verranno eseguite in opera e in laboratorio, affinché siano verificati i requisiti richiesti e su tutti i tipi di spazi didattici che presentano caratteristiche diverse. L'isolamento acustico deve essere garantito tra ambienti ad uso didattico adiacenti e sovrastanti, anche in caso di aule ad utilizzo non costante. I limiti di isolamento sono fissati tenendo conto dei requisiti minimi richiesti per scuole o aule di insegnamento generale e nel caso di tipologie ad insegnamento particolare, come ad esempio scuole di musica, possono essere richiesti valori più elevati di isolamento acustico. Possono essere soggette a requisiti più stringenti aule come auditorium, sale di musica e di spettacolo.

⁵⁶ Il D.M. 18/12/1975 è stato abrogato dalla Legge n.23 del 11/01/1996

In termini di verifiche e misure, l'isolamento e i requisiti acustici devono essere analizzati tramite i seguenti parametri:

- il potere fonoisolante (R) di strutture divisorie interne, di infissi verso l'esterno, di griglie, prese d'aria e pareti esterne opache;
- il coefficiente di assorbimento acustico dei materiali isolanti acustici.

Le frequenze nominali da utilizzare per le misurazioni sono i valori normalizzati di 125, 250, 500, 1.000, 2.000, 4.000 Hz. I requisiti di accettabilità si basano sull'indice I riferito al valore dell'ordinata a 500 Hz e sono i seguenti:

- potere fonoisolante di strutture divisorie interne verticali e orizzontali $I = 40$ dB;
- potere fonoisolante di infissi verso l'esterno $I = 25$ dB;
- potere fonoisolante di chiusure esterne opache: superiore di 10 dB a quella di infissi esterni;
- potere fonoisolante di griglie e prese d'aria installate verso l'esterno $I = 20$ dB;
- livello di rumore di calpestio normalizzato di solai $I = 68$ dB.

Il coefficiente di assorbimento deve essere misurato in camera riverberante e suono diffuso alle frequenze di 125, 250, 500, 1.000, 2.000, 4.000 Hz.

Il collaudo in opera invece riguarda la misurazione delle seguenti grandezze:

- l'isolamento acustico (D) per via aerea fra ambienti ad uso didattico adiacenti e sovrastanti (isolamento acustico tra pareti divisorie e di solaio);
- il livello di rumore di calpestio tra due spazi sovrapposti con la macchina normalizzata generatrice di calpestio;
- la rumorosità provocata da servizi ed impianti fissi;
- il tempo di riverberazione.

Per quanto concerne gli impianti dovranno essere eseguite misure su:

- impianti di riscaldamento, aerazione e condizionamento centralizzato;
- scarichi idraulici, bagni, servizi igienici, rubinetterie.

Questi parametri risultano accettabili se l'indice I , riferito al valore di 500 Hz risulta come di seguito:

- isolamento acustico fra due ambienti adiacenti $I = 40$ dB;
- isolamento acustico fra due ambienti sovrapposti $I = 42$ dB;
- livello di rumore di calpestio fra due ambienti sovrapposti $I = 68$ dB.

Se le divisioni tra ambienti sono realizzate tramite elementi movibili o scorrevoli, non è necessario effettuare misurazioni relative all'isolamento acustico tra questi ambienti. La rumorosità dei servizi, determinata dal massimo livello (A) misurato, non dovrà superare i seguenti limiti:

- Servizi a funzionamento discontinuo $A=50$ dB;
- Servizi a funzionamento continuo $A=40$ dB.

I valori ottimali dei tempi di riverberazione sono determinati in funzione del volume dell'ambiente e riferiti alle frequenze 125, 250, 500, 1.000 e 2.000 Hz, e sono rappresentati nella tabella sottostante.

Frequenza	Tempo di riverberazione
125 Hz	1,7
250 Hz	1,4
500 Hz	1,2
1.000 Hz	1,1
2.000 Hz	1,0

Tabella 7: Frequenza e tempo di riverberazione [fonte: DM 18/12/1975]

Il DPCM del 05.12.1997⁵⁷ prescrive i requisiti di isolamento acustico delle unità tecnologiche⁵⁸ e i limiti di rumorosità riferiti agli impianti a seconda della destinazione d'uso. Le grandezze che contribuiscono al comfort acustico sono:

⁵⁷ D.P.C.M. 5 dicembre 1997, n.297 - *Determinazione dei requisiti acustici passivi degli edifici*

⁵⁸ La UNI 8290-1:1981 definisce l'unità tecnologica come una unità che si identifica con un raggruppamento di funzioni, compatibili tecnologicamente, necessarie per l'ottenimento di prestazioni ambientali, ad esempio la classe di unità tecnologica "struttura" corrisponde all'insieme delle unità tecnologiche aventi funzione di sostenere i carichi del sistema edilizio stesso e collegare staticamente le due parti.

- L'isolamento acustico di facciata normalizzato rispetto al tempo di riverberazione, $D_{2m,nT,w}$;
- Il potere fonoisolante apparente di partizione tra ambienti, R'_w ;
- Il livello di rumore di calpestio di solai, normalizzato rispetto all'assorbimento equivalente, $L'_{n,w}$;
- Il livello massimo di pressione sonora ponderata A con costante di tempo *Slow*, per i servizi a funzionamento discontinuo, L_{ASmax} ;
- Il livello continuo equivalente di pressione sonora ponderata A, per i servizi a funzionamento discontinuo, L_{Aeq} .

I valori minimi e massimi riferiti a queste grandezze per l'edilizia scolastica sono riportati nella tabella 8.

$D_{2m,nT,w}$	R'_w	$L'_{n,w}$	L_{ASmax}	L_{Aeq}
≥ 48	≥ 50	≤ 58	≤ 35 dB	≤ 25 dB

Tabella 8: Valori limite per comfort acustico [fonte: DPCM 05/12/1997]

Per quanto riguarda il tempo di riverberazione, i limiti sono quelli riportati nella circolare del Ministero dei lavori pubblici n. 3.150 del 22 maggio 1967, recante i criteri di valutazione e collaudo dei requisiti. Nelle aule arredate la media dei tempi di riverberazione misurati alle frequenze di 250, 500, 1.000, 2.000 Hz non deve essere superiore a 1,2 s e nelle palestre a 2,2 s.

Condizioni dell'illuminazione e del colore:

L'illuminazione naturale e artificiale degli spazi e dei locali della scuola deve essere tale da assicurare agli alunni il massimo del comfort visivo; deve avere i seguenti requisiti:

- livello d'illuminazione adeguato;
- equilibrio delle luminanze;
- protezione dai fenomeni di abbagliamento;
- prevalenza della componente diretta su quella diffusa soprattutto nel caso di illuminazione artificiale.

È possibile riassumere i valori minimi dei livelli di illuminamento naturale ed artificiale nella tabella 9.

Allo scopo di garantire che le condizioni di illuminamento indicate siano assicurate in qualsiasi condizione di cielo e in ogni punto dei piani di utilizzazione considerati, dovrà

essere realizzata una stretta integrazione dell'illuminazione naturale con quella artificiale. Particolare cura dovrà essere posta per evitare fenomeni di abbagliamento sia diretto che indiretto facendo in modo che nel campo visuale abituale delle persone non compaiano oggetti la cui luminanza superi di 20 volte i valori medi.

Illuminamento sul piano di lavoro	lux
Sul piano dei tavoli negli spazi per il disegno, il cucito, il ricamo, ecc.	300
Sulle lavagne e sui cartelloni	300
Sul piano di lavoro negli spazi per lezione, studio, lettura, laboratorio, negli uffici	200
Negli spazi per riunioni, per ginnastica, ecc. misurati su un piano ideale posto a 0.60 m dal pavimento	100
Nei corridoi, scale, servizi igienici, atri, spogliatoi, ecc. misurati su un piano ideale posto a 1 m dal pavimento	100

Tabella 9: valori di illuminamento dipendenti dal piano di lavoro [fonte: DM 18/12/1975]

Affinché sia assicurata la realizzazione dei livelli di illuminamento prescritti e contemporaneamente le esigenze derivanti dalla protezione dall'irraggiamento solare è opportuno che il fattore medio di luce diurna, definito come il rapporto tra l'illuminamento medio dell'ambiente chiuso e l'illuminamento che si avrebbe, nelle identiche condizioni di tempo e di luogo, su una superficie orizzontale esposta all'aperto in modo da ricevere luce dall'intera volta celeste senza irraggiamento diretto del sole, sia uguale ai valori riportati nella tabella 10.

Fattore medio di luce diurna	η_m
Ambienti ad uso didattico (aule per lezione, studio, lettura, ecc.)	0,03
Palestre, refettori	0,02
Uffici, spazi per la distribuzione, scale, servizi igienici	0,01

Tabella 10: Valori del fattore medio di luce diurna [fonte: DM 18/12/1975]

Allo scopo di consentire, durante il giorno, proiezioni di films, diapositive, ecc., i locali ad uso didattico dovranno essere muniti di dispositivi per attenuare il livello di illuminazione naturale e alcuni locali dovranno essere predisposti per un completo oscuramento. Per quanto riguarda l'illuminazione artificiale i minimi valori richiesti devono essere ottenuti con opportuni apparecchi di illuminazione, compresi, come parte integrante, nell'impianto elettrico.

In dettaglio, la progettazione illuminotecnica fa riferimento alla UNI 10840 "Luce e illuminazione – Locali scolastici – Criteri generali per l'illuminazione artificiale e naturale",

nell'ottica sia di assicurare il comfort degli utenti sia di ottimizzare il consumo energetico. I parametri da tenere in considerazione per la progettazione di un impianto illuminotecnico sono:

- il livello e l'uniformità dell'illuminamento. Si stabilisce tramite l'illuminamento medio mantenuto E_n riferito in generale alla superficie di lavoro orizzontale all'altezza di 0,85 m dal pavimento e per 0,2 m per le zone di transito;
- la ripartizione delle luminanze;
- la limitazione dell'abbagliamento tramite la classe di qualità G;
- il fattore medio di luce diurna η_m ;
- il colore della luce e la resa del colore Ra, cioè la proprietà di una sorgente luminosa di restituire i colori nel modo più fedele possibile rispetto a una sorgente di riferimento.

La luce naturale ed in particolare l'eccessivo contrasto di luminanza possono essere causa di fastidiosi fenomeni di abbagliamento. L'abbagliamento dovuto alla luce naturale può essere verificato facendo riferimento all'indice di abbagliamento DGI (*Daylight Glare Index*). Questo parametro dipende essenzialmente dalla luminanza della sorgente ed è costante in tutti gli ambienti interni con finestre di dimensioni maggiori del 2% della superficie del pavimento e quindi varia in funzione della luminanza della sorgente e del fattore medio di riflessione dell'ambiente interno. Considerata la difficoltà di definire i parametri necessari al calcolo del DGI, il controllo dell'abbagliamento naturale dipende essenzialmente dalle condizioni di luminanza della porzione di cielo inquadrata dalla superficie vetrata. Anche la dimensione e la posizione della superficie vetrata, il contrasto di luminanza tra le superfici interne dell'ambiente determinato dai relativi fattori di riflessione luminosa, l'eventuale presenza di schermi interni o esterni, possono provocare l'insorgenza di fenomeni di abbagliamento. Particolare importanza possono assumere il fattore di riflessione del soffitto e delle superfici immediatamente adiacenti la superficie vetrata.

Condizioni termoigrometriche e purezza dell'aria

I fatti o i fenomeni presi in considerazione che influiscono sull'abitabilità e comfort dell'ambiente, devono rispondere ai requisiti che riguardano:

- l'equilibrio e la conservazione dei fattori fisici dai quali dipende il benessere termoigrometrico;
- la conservazione della purezza chimica e microbiologica dell'aria.

Per assicurare il comfort dell'ambiente i parametri che vengono utilizzati per misurazioni e controlli sono:

- La temperatura degli ambienti adibiti ad uso scolastico, che deve essere assicurata in stagione invernale da un adatto impianto di riscaldamento, capace di garantire in tutti gli ambienti le condizioni interne di temperatura di $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, tranne i casi in cui sia prescritto diversamente per ambienti ad uso particolare. Inoltre, negli edifici con impianti di riscaldamento, che devono mantenere la temperatura interna di 20°C in condizioni invernali, in nessun punto della superficie interna delle chiusure esterne opache delimitanti ogni ambiente, la temperatura superficiale deve risultare inferiore a 14°C quando si verificano le condizioni di temperatura esterna di progetto.
- L'umidità relativa, che negli ambienti interni adibiti ad attività didattiche e collettive nel periodo invernale, tramite un trattamento di umidificazione dell'aria esterna effettuato dall'impianto di ventilazione idoneo, è presente al 45-55% e mantiene la temperatura a 20°C .
- La tenuta all'aria, assicurata dalla chiusura esterna considerata nel suo insieme (compresi quindi infissi, giunti, ecc.), che deve essere tale da realizzare all'interno dell'ambiente una pressione statica di 10 mm di colonna d'acqua con un ventilatore di portata non superiore a $10 \text{ m}^3/\text{h}$ per ciascun m^2 di superficie frontale della chiusura considerata.

La purezza chimica e microbiologica è garantita da:

- L'introduzione di opportune portate d'aria esterna determinate dal coefficiente di ricambio, ovvero il rapporto tra il volume di aria introdotto ogni ora nell'ambiente e il volume dell'ambiente stesso, che varia a seconda della tipologia di scuola, come si riporta nella tabella 11.

Ambienti adibiti ad attività didattica collettiva o di gruppo	V/h
Scuole materne ed elementari	2,5
Scuole medie	3,5
Scuole secondarie di 2° grado	5
Ambienti di passaggio, uffici	1,5
Servizi igienici, palestre, refettori	2,5

Tabella 11: Coefficienti di ricambio d'aria per tipologia di scuole [fonte: DM 18/12/1975]

Inoltre, se sono presenti delle condizioni esterne di grave inquinamento atmosferico, dovrà porsi particolare cura per quanto riguarda la presa dell'aria esterna. La norma tecnica UNI 10339⁵⁹ in vigore dal 1995, regola la ventilazione negli edifici non residenziali per il dimensionamento degli impianti. Questa norma è stata redatta dal CEN (Comitato Normatore Europeo)⁶⁰ per ridurre i consumi energetici, ed in particolare determinare il fabbisogno di energia per riscaldamento, ventilazione e climatizzazione, garantendo il comfort termo-igrometrico degli utenti. Il testo normativo contiene una classificazione dei possibili sistemi impiantistici da prevedere, dei requisiti minimi che devono essere soddisfatti e dei valori delle grandezze di riferimento durante il loro funzionamento. La sensazione termica dell'uomo è legata al bilancio di energia del corpo, al fine di garantire accettabili livelli di benessere per gli occupanti e contemporaneamente contenere i consumi energetici, gli impianti aeraulici per la climatizzazione devono consentire il mantenimento delle seguenti condizioni ambientali:

1. La qualità e il movimento dell'aria;
2. Le condizioni termiche e igrometriche dell'aria specifiche delle funzioni assegnate.

Per quanto riguarda la qualità e il movimento dell'aria, l'impianto deve assicurare:

- Un'immissione di aria esterna pari o maggiore ai valori minimi, per ciascun tipo di destinazione d'uso, riferiti al numero di persone presenti, o alla superficie in pianta, o al volume dell'ambiente;
- Una filtrazione minima convenzionale dell'aria (esterna e ricircolata) tramite impiego di filtri di classe appropriata, per ciascun tipo di locale;

⁵⁹ UNI 10339:1995 - *Impianti aeraulici al fine di benessere. Generalità, classificazione e requisiti. Regole per la richiesta d'offerta, l'offerta, l'ordine e la fornitura.*

⁶⁰ Ente europeo con personalità giuridica di carattere privatistico senza scopo di lucro con la finalità di armonizzare in sede europea le normative nazionali dei paesi membri nei vari campi tecnici.

- Una movimentazione dell'aria (nel volume convenzionale occupato) con velocità comprese entro i limiti.

Sorgenti interne di inquinanti, derivanti ad esempio da materiali presenti da costruzione, da arredo, ecc., oppure sorgenti esterne locali come le attività industriali artigianali con emissioni inquinanti, scarichi di veicoli di trasporto, richiedono specifica valutazione e devono essere esplicitamente richiamate nei documenti contrattuali. In questi casi le caratteristiche dell'impianto devono comunque assicurare condizioni ambientali igieniche e di benessere, anche mediante deroga alle indicazioni specificate dalla norma. Ai fini del ricambio dell'aria si ritiene che la qualità dell'aria esterna sia considerata accettabile se sono soddisfatti i parametri nella tabella riportata di seguito. I dati sono stati elaborati dall'E.P.A. (*Environmental Protection Agency* o Agenzia per la protezione dell'ambiente)⁶¹ e tratti dalla norma ASHRAE⁶² Standard 62-2019 "Valutazione per una accettabile qualità dell'aria interna".

Contaminante	Lungo termine			Breve termine		
	Concentrazione media			Concentrazione media		
	µg/m ³	ppm	periodo	µg/m ³	ppm	periodo
Biossido di zolfo (SO ₂)	80	0,03	1 anno	365	0,14	24 h
Particolato totale	75*	-	1 anno	260	-	24 h
Monossido di carbonio (CO)	-	-	-	40.000	35	1 h
Monossido di carbonio (CO)	-	-	-	10.000	9	8 h
Ossidanti (O ₃) (Ozono)	-	-	-	235	0,12	1 h
Biossido di azoto (NO ₂)	100	0,055	1 anno	-	-	-
Piombo	1,5	-	3 mesi	-	-	-
*Media aritmetica						

Tabella 12: Livelli limite di inquinanti [fonte: vedi nota 61]

La normativa stabilisce le portate di aria esterna e di estrazione da adottare per le diverse tipologie edilizie, secondo le seguenti condizioni:

- Le portate di aria esterna Q_0 sono riferite alla temperatura di 15°, 101, 325 kPa, aria secca;

⁶¹ Agenzia del governo federale degli Stati Uniti preposta alla protezione della salute umana e dell'ambiente, con compiti prevalenti di regolamentazione e applicazione delle leggi approvate dal Congresso. La tabella 12 fa riferimento ai NAAQS (*National Ambient Air Quality Standards*) presenti al link <https://www.epa.gov/criteria-air-pollutants/naaqs-table>, consultato il 30/06/2021

⁶² La *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers* è un ente internazionale con sede a New York che si occupa di normative nei campi di riscaldamento, ventilazione, condizionamento dell'aria e refrigerazione.

- I valori indicati si riferiscono ad impianti a regime, è consigliata la riduzione delle portate di aria esterna ed eventualmente il funzionamento a totale ricircolo durante la fase di transitorio termico di avviamento dell'impianto precedente alla utilizzazione dei locali;
- L'indicazione "estrazioni" indica che le portate di aria esterna, immesse negli ambienti di stazionamento, devono essere estratte, nelle quantità necessarie, preferibilmente attraverso i locali indicati nella tabella 13, che devono essere mantenuti in depressione.

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 per m ²)	
Asili nido e scuole materne	4	-	-
Aule scuole elementari	5	-	-
Aule scuole medie inferiori	6	-	-
Aule scuole medie superiori	7	-	-
Aule universitarie	7	-	-
Transiti, corridoi	-	-	-
Servizi	Estrazioni	Estrazioni	A
Biblioteche, sale lettura	6	-	-
Aule musica e lingue	7	-	-
Laboratori	7	-	-
Sale insegnanti	6	-	-
Note: A – Ricambio richiesto nei servizi igienici: per categorie diverse dal residenziale 0,0022 vol/s (8 vol/h)			

Tabella 13: Portate d'aria per edifici scolastici [fonte: UNI 10339]

La presa aria esterna 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 questo 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 un'altezza minore di 4 m dal piano stradale più elevato di accesso all'edificio.

Deve anche essere considerata la direzione dei venti dominanti e la posizione relativa di sorgenti di inquinamento rispetto alla posizione della presa di aria esterna.

Per quanto riguarda l'efficienza di filtrazione dell'aria, invece, dobbiamo fare riferimento alla UNI 10339, attualmente in stato di revisione, che prevedeva il seguente sistema di classificazione:

Classe	Efficienza del filtro	Campo di efficienza %
1-4	M	$E < 65$, $65 \leq E \leq 90$, $E \geq 90$
5-9	A	$40 \leq E \leq 95$, $E \geq 95$
10-14	AS	$95 \leq E \leq 99,999$, $E \geq 99,999$

Tabella 14: Classi di filtrazione dell'aria [fonte: UNI 10339]

Dove M sta per "media efficienza", A per "alta efficienza" e AS "altissima efficienza" e filtri assoluti. Ogni filtro avente una data efficienza di filtrazione deve essere preceduto da un filtro avente efficienza compresa nella categoria precedente. Quindi si possono avere tre casi:

M

M+A

M+A+AS

La filtrazione deve essere effettuata sia sull'aria esterna che su quella di ricircolo e deve essere posta particolare attenzione sul posizionamento dei filtri sul circuito aeraulico, tale da non compromettere la qualità dell'aria raggiunta con eventuali sorgenti di polvere a valle dei filtri. La UNI 10339 stabilisce classe ed efficienza di filtrazione in base alla tipologia di edificio, si riportano di seguito i valori corrispondenti agli edifici ospitanti attività scolastiche:

Edifici adibiti ad attività scolastica	Classe di filtri		Efficienza di filtrazione
	Min	max	
Scuole materne ed elementari	7	9	M+A
Aule in genere	5	6	M+A
Aule musica e lingue	6	7	M+A
Laboratori	6	7	M+A

Tabella 15: Classe di filtro per tipologia di scuola e aula [fonte: UNI 10339]

Il tema della filtrazione è stato poi successivamente rivisto tramite la UNI EN 13779⁶³, che seppure abbia definito un metodo uniforme nella selezione dei filtri, ha il limite di testare solamente la prestazione dei filtri con particelle di dimensione di 0,4 µm, suddividendole nelle classi grossolane (G), medie (M) e fini (F). Solo con la UNI EN ISO 16890:2017⁶⁴, entrata in vigore da marzo 2017, vengono considerate particelle di particolato di diversa dimensione con un range di variabilità tra i 0,3 µm e 10 µm. Al valore ePM_x, cioè l'efficacia di filtraggio delle particelle, si associa una percentuale di particolato che il filtro trattiene; per i filtri che non raggiungono il 50% di efficienza per particelle PM10 viene indicata la classe COARSE, che corrisponde ai vecchi filtri grossolani (Tab. 16).

Classe	Efficienza minima	Tipo di PM
ISO ePM ₁	e(PM ₁), min _≥ 50%	Virus, nanoparticelle, fumi
ISO ePM _{2.5}	e(PM _{2.5}), min _≥ 50%	Polvere di toner, funghi, spore, polline e batteri
ISO ePM ₁₀	e(PM ₁₀), min _≥ 50%	Polvere, pollini vari
ISO COARSE	e(PM ₁₀), min<50%	Sabbia, capelli

Tabella 16: Classi di filtro [fonte: UNI EN ISO 16890]

Di seguito una tabella con un confronto tra i filtri classificati con la UNI EN 13779, non più in vigore e la ISO 16890, a cui tuttora si fa riferimento:

Classe (UNI EN 13779)	ISO ePM ₁	ISO ePM _{2.5}	ISO ePM ₁₀	ISO COARSE
G1	-	-	-	>40%
G2	-	-	-	>70%
G3	-	-	-	>80%
G4	-	-	-	>90%
M5	5-20%	10-35%	>50%	-
M6	20-40%	50-65%	>60%	-
F7	50-65%	65-80%	>85%	-
F8	65-80%	>80%	90%	-
F9	>80%	>90%	>95%	-

Tabella 17: Confronto delle classi di filtraggio [fonte: UNI EN 13779 e UNI EN ISO 16890]

⁶³ UNI EN 13779:2008 - *Ventilazione degli edifici non residenziali - Requisiti di prestazione per i sistemi di ventilazione e di climatizzazione*

⁶⁴ UNI EN ISO 16890:2017 - *Filtri d'aria per ventilazione generale - Parte 1: Specifiche tecniche, requisiti e sistema di classificazione dell'efficienza basato sul particolato (ePM)*

Infine, per quanto riguarda il movimento dell'aria, la UNI 10339 specifica che devono essere rispettati i valori in tabella 18, a meno che non sia richiesto diversamente. Nei locali di stazionamento possono essere installate griglie di estrazione o di ripresa, purché la loro ubicazione sia la più lontana possibile dai luoghi di normale permanenza delle persone. In questi casi è tollerata una velocità massima di 0,30 m/s per le superfici che si trovano a 0,6 m dal perimetro della griglia.

Edifici ad uso scolastico	Velocità dell'aria, v, m/s	
	Riscaldamento	Raffrescamento
Scuole materne ed elementari	<0,10	>0,10
Aule di istituti medie superiori	Da 0,05 a 0,15	Da 0,05 a 0,20
Altri locali	Da 0,05 a 0,15	Da 0,05 a 0,20

Tabella 18: Limiti di velocità dell'aria per aule [fonte: UNI 10339]

Per garantire un'alta qualità dell'ambiente interno è necessario che siano rispettate le condizioni di benessere termico e igrometrico. I requisiti in stagione invernale sono i seguenti:

	Temperatura a bulbo secco	Umidità relativa
Condizioni interne	$\leq 20^{\circ}\text{C}$	35%-45%
Condizioni esterne	Valori norme UNI vigenti	60%

Tabella 19: Condizioni termoigrometriche in regime invernale [fonte: UNI 10339]

Una temperatura minore di 20°C può essere consentita in casi particolari di attività fisica, resistenza del vestiario e temperatura media radiante.

Le condizioni estive sono riassunte nella seguente tabella:

	Temperatura a bulbo secco	Umidità relativa
Condizioni interne	$>26^{\circ}\text{C}$	50%-60%
Condizioni esterne	Secondo dati climatici	Secondo dati climatici

Tabella 20: Condizioni termoigrometriche in regime estivo [fonte: UNI 10339]

I dati climatici si possono consultare nella stessa UNI 10339, se non è presente la località precisa si fa riferimento a quella topograficamente più vicina.

1.6. Le Linee Guida MIUR del 2013

Le linee guida del MIUR del 2013 nascono dalla necessità di ridefinire lo spazio educativo, visto che per molto tempo l'aula è stata l'unico luogo dell'istruzione scolastica, i corridoi solo dei luoghi di transito e i laboratori utilizzati solo per le attrezzature speciali. Questi ultimi spazi venivano usati in dei momenti diversi dalla didattica quotidiana, e ognuno era limitato allo svolgimento di una propria funzione, rimanendo inutilizzato per tutto il resto del tempo. La necessità odierna è invece quella di percepire la scuola come uno spazio unico integrato, in cui microambienti finalizzati ad attività diversificate hanno la stessa dignità e presentano caratteri di abitabilità e flessibilità in grado di accogliere in ogni momento persone e attività della scuola rispettando i criteri di funzionalità, comfort e benessere. Alla base di una nuova concezione dello spazio c'è il principio di movimento per lo studente, che può essere garantito solo da uno spazio flessibile e polifunzionale che quindi favorisca l'integrazione, la complementarità e l'interoperabilità, perché impostato su diverse configurazioni alunni-docente o alunni-alunni. Infatti, il docente non ha un posto fisso ma si muove tra i tavoli svolgendo il suo ruolo di supporto e facilitazione dell'apprendimento. Essendo crescente l'utilizzo delle tecnologie, è necessario che ci sia una progettazione integrata tra gli ambienti; la divisione dello spazio interno si concretizza in pareti con buon livello di isolamento acustico e pareti mobili, oltre all'ottimizzazione della luce naturale. L'edificio scolastico è pensato in modo da lasciare sempre una possibilità di variazione dello spazio a seconda dell'attività desiderata. Questo anche grazie agli arredi che permettono di aumentare il tempo di permanenza potendo riconfigurare lo spazio in base all'attività da svolgere. La finalità di questo processo è di rendere l'ambiente scolastico maggiormente vivibile, non solo per lo svolgimento delle specifiche attività didattiche ma anche per la fruizione di servizi o usi di tipo informale. Queste linee guida hanno un approccio di tipo prestazionale, abbandonando lo stile prescrittivo del decreto ministeriale del 1975, in modo da rendere gli spazi versatili rispetto agli obiettivi di apprendimento. La nuova scuola è concepita come un tessuto ambientale in cui vi è una naturale fluidificazione delle categorie degli spazi; tuttavia, per comodità e chiarezza, si possono distinguere alcune categorie: le principali innovazioni riguardano la sezione, la piazza o agorà, gli atelier, gli spazi di apprendimento informale e dedicati al *civic center*. L'aula, da sempre vista come unico ambiente di didattica quotidiana, in cui il docente trasmetteva agli studenti conoscenze da acquisire posto di fronte a file di ragazzi nei

banchi, è oggetto di ripensamento. L'aula moderna rimane uno spazio di apprendimento, ma rappresenta un momento del percorso complessivo incentrato sullo studente. Le aule/sezioni divengono un ruolo di appartenenza importante, consentono attività in piccoli e grandi gruppi ma anche individuali, le pareti scorrevoli consentono di coinvolgere spazi interclasse o di allargarsi negli spazi comuni rendendo i confini della sezione flessibili. La classe fa parte di un organismo più complesso, diventa la "home-base" da cui si parte e dove si torna ed assume un ruolo diverso nel contesto scolastico in base al tipo di scuola e all'età degli alunni. Per la scuola dell'infanzia la sezione deve essere facilmente frazionabile e contenere spazi riservati alle attività individuali, per le attività motorie e specializzati, separati da vetrate e acusticamente protetti, per attività di gruppi limitati di bambini. . Inoltre, prevedendo il riposo pomeridiano dei bambini è necessario che siano presenti delle attrezzature che lo consentano anche a livello di arredi come, ad esempio, lettini impilabili o sistemi mobili oppure una pavimentazione morbida multiuso adiacente alla sezione. Per le classi più piccole della scuola primaria il modello di sezione può rimanere approssimativamente simile alla scuola dell'infanzia, mentre per i bambini più grandi si può pensare a un modello che assuma le caratteristiche della home-base della scuola media e poi la superiore. Per queste due tipologie lo spazio sarà costituito da ambienti a dimensione variabile, separati da pareti scorrevoli opache o trasparenti a seconda delle necessità basate su di una matrice dimensionale che consente sia il lavoro in piccoli gruppi sia le lezioni per 60/70 allievi. La variabilità degli spazi deve essere accompagnata da una modularità dei sistemi impiantistici, come l'illuminazione e l'aria primaria e si dovrà facilmente poter regolare l'illuminazione esterna in base alle attività che si devono svolgere. La Piazza ospita le funzioni pubbliche della scuola; è lo spazio dove si svolgono le riunioni e le feste della comunità scolastica e rappresenta un punto di riferimento per la distribuzione dell'edificio. Può diventare luogo di incontri informali, contenere zone gioco, zone pranzo o angoli dedicati all'accogliimento bambini. Incrementando le dimensioni dell'edificio, se le funzioni diventano più complesse, la Piazza diventa Agorà. Costituisce un centro di distribuzione dei percorsi orizzontali e verticali ed è connessa a tutte le attività pubbliche e può essere collegata a zone per il pranzo o per le attività motorie. È previsto che per un edificio di più di 250 alunni l'Agorà possa essere associato a uno spazio con un palco leggermente rialzato, facilmente separabile e dotato di alcune attrezzature. Per questi ambienti dovrà essere particolarmente curato l'aspetto

acustico, con un tempo di riverberazione minore di 1.2 secondi. Gli atelier, cioè ambienti che si specializzano con le dotazioni tecnologiche e gli arredi, svolgono un ruolo di attrattori nel tessuto ambientale, non sono dedicati ad una sola disciplina ma possono ospitare attività quali il disegno, la pittura, la scultura, la danza. La progettazione di questi spazi prevede una particolare predisposizione degli impianti, con punti che raccolgono gli allacci all'energia elettrica, l'approvvigionamento idrico, lo scarico in modo da poter cambiarne con facilità nel breve e nel lungo periodo l'uso e devono essere dotati di depositi per la conservazione dei materiali che possono essere utilizzati. Si pone l'attenzione anche sugli spazi connettivi, per creare degli ambienti in cui le relazioni siano informali, gli studenti possano lavorare da soli o in piccoli gruppi, approfondire degli argomenti con gli insegnanti, rilassarsi. Possono inoltre essere utilizzati dai genitori stessi come luogo per la seduta e la conversazione. Quindi avviene un ripensamento del corridoio come spazio comune disponibile, caratterizzato da arredi, piani di lavoro, privacy visiva diventando un *open space*, mantenendo però intatto per ciascuno studente il proprio spazio personale per organizzare in autonomia attività con totale accesso alla rete e in condizioni di comfort fisico, acustico e termo-igrometrico. I luoghi preposti a *civic center* possono essere sia l'Auditorium o Aula Magna, nell'ottica di poter ospitare conferenze, spettacoli teatrali e musicali e per essere utilizzato senza interferire con la vita scolastica, avrà un accesso a parte con guardaroba e servizi igienici dedicati. Oltre a questo, per le scuole di dimensioni importanti si potranno avere altri elementi che possono essere funzionalmente considerati *civic center*, come librerie, piccoli negozi di materiale scolastico, bar-caffetteria, sedi di società culturali o sportive. Alla flessibilità degli ambienti, la cui densità di frequentazione può variare in modo marcato, deve corrisponderne una impiantistica. In primis è necessario che vi sia una flessibilità spaziale dato l'uso diversificato dei luoghi della scuola che rende necessario poter attivare i sistemi di riscaldamento, raffrescamento, illuminazione per solo una parte dell'edificio oppure per un ambiente dimensionalmente variabile tramite le pareti scorrevoli. La flessibilità riguarda però anche la tipologia di utenti); infatti, è diverso climatizzare un ambiente che ospita molti adulti, come nel caso di riunioni e uno occupato da pochi bambini. È quindi necessario che vi sia la possibilità di accendere e spegnere gli impianti nel momento in cui servono e di poterli regolare separatamente.

2. La qualità dell'aria all'interno degli edifici scolastici

2.1. Possibili soluzioni per garantire l'adeguata salubrità dell'aria

Le analisi precedenti hanno evidenziato che è il livello di inquinanti a determinare la qualità dell'aria all'interno di un ambiente. Nonostante la salubrità dell'aria risulti essere già da parecchio tempo una problematicità negli edifici scolastici esistenti, causando o accentuando problemi di salute e assenteismo, a causa dell'epidemia di SARS-COVID-2019 la situazione presenta delle criticità maggiori e sempre più urgenti da risolvere. Di base gli inquinanti che si trovano in un ambiente indoor sono i composti organici volatili VOC, l'anidride carbonica e il particolato atmosferico⁶⁵; questi non derivano solamente da fattori esterni ma anche gli stessi bambini, ragazzi e insegnanti sono vettori che trasportano i composti tramite vestiario, profumi, oggetti di cancelleria e saturano l'ambiente di CO₂ con la respirazione. Trattandosi di edifici scolastici non sarà mai possibile avere un ambiente privo di persone e conseguentemente di inquinanti derivanti da esse ma si può creare un ambiente qualitativamente migliore agendo sul ricambio dell'aria nel momento in cui si raggiungono i livelli di soglia limite. I livelli di concentrazione nell'aria dei VOC sono stabiliti dall'ANSES (*Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail*)⁶⁶ e dal AgBB (*Ausschuss zur gesundheitlichen Bewertung von Bauprodukten*)⁶⁷, cioè due agenzie per la sicurezza nel mondo del lavoro che periodicamente pubblicano delle liste di rischio con un elenco di tutti i VOC affiancati dalle LCI (*Lower Concentration of Interest*), cioè le soglie minime al di sotto delle quali l'organismo non registra effetti nocivi; per avere un'ottima qualità dell'aria la concentrazione totale deve essere minore uguale a 300 µg/m³. I valori limite di anidride carbonica invece sono dettati dall'ASHRAE:2001 e stabiliscono che negli ambienti indoor la concentrazione deve essere pari al livello esterno di CO₂ addizionato di 700 ppm; il valore medio mensile outdoor è misurato tramite la curva di Keeling presso l'osservatorio di Mauna Loa, ed è pari a 417 ppm (misura di picco a maggio 2020), quindi la concentrazione indoor dovrebbe non superare i 1.117 ppm e viene considerata ottimale se minore di 800 ppm. La conseguenza di una concentrazione alta di anidride carbonica

⁶⁵ Busa, L (2020), *Progettare l'aria: Salute e salubrità negli ambienti indoor*, Maggioli Editore, Santarcangelo di Romagna, p. 13

⁶⁶ Dal 2010 l'ANSES ha inglobato l'AFFSET (*Agence française de sécurité sanitaire de l'environnement et du travail*). La missione dell'ente pubblico è di effettuare la valutazione dei rischi e informare le autorità competenti, fornire la competenza scientifica e tecnica per le misure di gestione di questi.

⁶⁷ Il Comitato per la valutazione della salute dei prodotti da costruzione ha sviluppato uno schema di valutazione per le emissioni di VOC dei prodotti da costruzione ad uso interno.

è l'aumento dei VOC, che già risultano incrementati a causa dei protocolli di igienizzazione necessari per contrastare la pandemia immettendo nell'aria ulteriori composti chimici. Le polveri sottili invece, le cui quantità sono regolate dal D. Lgs. 13 agosto 2010, n. 155⁶⁸, non dovrebbero superare in città i 50 µg/m³, mentre la concentrazione nell'aria interna dovrebbe attestarsi su valori di circa la metà. Gli inquinanti derivano quindi tanto da fonti esterne come il traffico o la presenza di industrie, quanto da fonti interne, essendo le stesse persone frequentanti l'ambiente vettori di VOC e produttori di anidride carbonica. I ricambi d'aria tramite la ventilazione favoriscono la fuoriuscita dell'anidride carbonica quando l'ambiente è saturo; per i composti organici volatili, invece, la situazione risulta più complessa da gestire. Una delle possibili soluzioni è di ridurre la circolazione di batteri, virus, muffe e VOC tramite un sistema di purificazione dell'aria attivo o passivo⁶⁹. Nel caso in cui vi sia un sistema di ventilazione meccanica nell'edificio si può inserire nei canali di passaggio dell'aria un dispositivo attivo di sanificazione, cioè una batteria di post trattamento che sfrutta il principio della ionizzazione, lo stesso fenomeno che avviene durante i temporali attraverso la scarica dei fulmini, che ha come effetto la purificazione dell'aria⁷⁰. La differenza di potenziale elettrico generata dall'apparecchio è sufficiente per trasformare gli inquinanti in sostanze innocue e funziona molto bene per gli inquinanti allergenici, i batteri patogeni e gli agenti virali. Tra i sistemi di purificazione passiva si possono trovare i materiali fotocatalitici, prodotti non esistenti in natura, che quando attivati dall'energia ultravioletta, riescono a innescare processi inertizzanti nei confronti di molti VOC; questo sistema, che si attiva solo nella ristretta gamma di frequenza energetica dei raggi UV, risulta più efficace all'esterno⁷¹. È possibile agire anche sui materiali da costruzione, scegliendone alcuni che presentano caratteristiche non-riemissive, cioè capaci di assorbire e inertizzare le sostanze chimiche presenti nell'ambiente inibendone il successivo rilascio nel tempo; durante l'assorbimento i composti coinvolti vengono legati ad alcuni additivi presenti nel materiale e privati della loro capacità reattiva nei confronti

⁶⁸ Attuazione della Direttiva 2008/50/CE del Parlamento Europeo e del Consiglio, del 21 maggio 2008, relativa alla qualità dell'aria ambiente e per un'aria più pulita in Europa, Allegato XIV-Obiettivo nazionale di riduzione dell'esposizione, valore-obiettivo e valore limite per il PM_{2,5}

⁶⁹ Ivi, nota 65, pp. 71-73

⁷⁰ Ibidem, nota 69

⁷¹ Ibidem, nota 69

dell'ambiente circostante⁷². Questi prodotti funzionano molto bene per i VOC e possono essere delle tinte murali⁷³, dei pannelli a base gesso, degli intonaci, dei rasanti.

La qualità dell'aria è quindi uno dei parametri che concorre alla definizione di comfort *indoor* ed è possibile valutare lo stato di benessere di un ambiente attraverso il modello di Fanger descritto dalla UNI EN ISO 7730 tramite gli indici PMV (*Predicted Mean Vote*) e il PPD (*Predicted Percentage of Dissatisfied*). Il microclima si basa sia su parametri ambientali come la temperatura dell'aria, l'umidità relativa, la temperatura media radiante e la velocità dell'aria sia su parametri individuali come il metabolismo, il vestiario, l'attività che viene svolta, il sesso, l'età. Il PMV è un indice che prevede il valore medio dei voti di un consistente gruppo di persone sulla scala di sensazione termica a sette punti esposta nella tabella 21, basato sul bilancio di energia termica del corpo umano, che è verificato quando la produzione interna di energia termica uguaglia la quantità di energia termica ceduta all'ambiente.

+3	Molto caldo
+2	Caldo
+1	Leggermente caldo
0	Neutro
-1	Leggermente freddo
-2	Freddo
-3	Molto freddo

Tabella 21: Scala di sensazione termica [fonte: UNI EN ISO 7730]

Questo parametro può essere calcolato per differenti combinazioni di metabolismo energetico, isolamento dell'abbigliamento, temperatura dell'aria, temperatura media radiante, velocità dell'aria e umidità e viene calcolato in condizioni stazionarie. L'indice PPD invece rappresenta la percentuale di persone termicamente insoddisfatte, che sentono troppo caldo o troppo freddo ed è in funzione del PMV. La relazione tra i due parametri si può vedere tramite il grafico in figura 14, in cui si nota subito che non si arriverà mai ad una percentuale di insoddisfatti pari a zero.

⁷² Ibidem, nota 69

⁷³ Un esempio in commercio è la pittura per interni Caparol, maggiori informazioni al link https://www.caparol.it/fileadmin/data_it/Materiali_Informativi_PDF/Brochure_Caparol_Pitture_Interni_LR.pdf, consultato il 15/07/2021

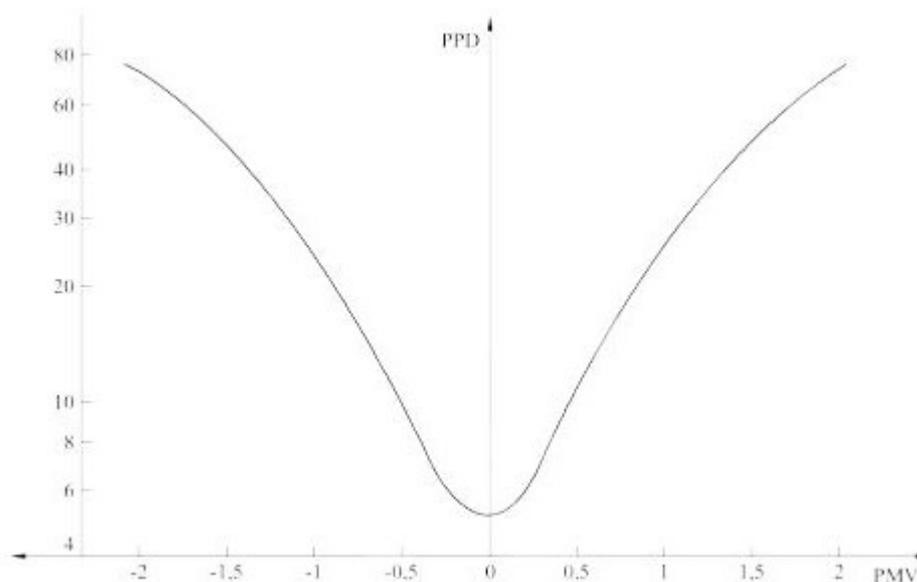


Figura 13: PPD in funzione del PMV [fonte: UNI EN ISO 7730]

In particolare, nella tabella 22 si ha la corrispondenza tra la categoria che esprime il benessere termoigrometrico, la PPD e il PMV. La categoria IV, che prevede un grado di insoddisfazione alto non è sinonimo di rischio per la salute ma solo un indicatore di discomfort termico.

Categoria	PPD	PMV
I	<6	-0,2<PMV<+0,2
II	<10	-0,5<PMV<+0,5
III	<15	-0,7<PMV<+0,7
IV	<25	-1<PMV<+1

Tabella 22: Relazione tra categoria di benessere, PPD e PMV [fonte: UNI EN ISO 7730 e UNI EN 16798]

Essendo il benessere termico una condizione mentale di soddisfazione nei confronti dell'ambiente termico, a causa della sensibilità individuale, il livello di soddisfazione non sarà mai pari al 100%.

In merito ai ricambi d'aria nei prossimi paragrafi verranno illustrate le possibili strategie di ventilazione fornendo alla fine un sommario di vantaggi e svantaggi che ogni tipologia comporta.

2.1.1. La ventilazione

Con lo scopo di ridurre la quantità di inquinanti all'interno degli ambienti è necessario progettare un sistema di ventilazione adeguato. Le possibili tipologie di sistemi di ventilazione sono tre:

- Naturale;
- Meccanica;
- Ibrida.

A prescindere da quale sia il sistema che viene scelto, lo scopo della ventilazione è che vi sia il corretto ricambio di aria degli spazi confinati garantendo il comfort termoigrometrico degli utenti e la salubrità dell'aria. Inoltre, devono essere soddisfatti gli aspetti di distribuzione uniforme all'interno degli ambienti, la garanzia di un ricambio minimo attraverso la ventilazione, l'efficacia del sistema di filtraggio in base alla tipologia di utenza e la riduzione al minimo di polveri e inquinanti⁷⁴. Per comprendere al meglio qual è il ruolo della ventilazione meccanica controllata, possiamo esaminare l'andamento della concentrazione di anidride carbonica all'interno di tre aule campione.⁷⁵ Il primo grafico in figura 15 mostra la concentrazione di CO₂ in un'aula con un ricambio di aria tramite apertura delle finestre ogni 20/25 minuti; l'andamento presenta una veloce diminuzione della concentrazione quando viene ricambiata l'aria e un altrettanto rapido aumento nel momento di chiusura dei serramenti. Nel complesso i valori della concentrazione riescono comunque a rimanere in un range di accettabilità. Se invece il ricambio di aria avviene solo al cambio di lezione (Fig. 16), è possibile notare che i livelli di anidride carbonica salgono notevolmente sopra la soglia di tolleranza raggiungendo anche 2.900 ppm. L'aula dotata di impianto di ventilazione meccanica controllata presenta i valori di concentrazione migliori, raggiungendo al massimo i 1.200 ppm che rappresenta un valore tollerabile⁷⁶ (Fig.17).

⁷⁴ Stefanutti, L, direzione e coordinamento di, (2007), *Manuale degli impianti di climatizzazione*, Tecniche Nuove, Milano, cap. 17 pp. 1-2

De Santoli, L & Mancini, F (2017), *La progettazione degli impianti di climatizzazione*, Maggioli, Santarcangelo di Romagna, pp. 165-166

⁷⁵ La misurazione è stata condotta nelle scuole dell'Alto Adige nel 2015/2016 dall'Agenzia provinciale per l'ambiente e la tutela del clima. Per maggiori informazioni sul progetto è possibile consultare la pagina <https://ambiente.provincia.bz.it/progetti/aria-viziata-a-scuola-iniziativa.asp#dettagli-misure>, consultato il 15/07/2021

⁷⁶ ANSI/ASHRAE Standard 62.1-2001 – *Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality*

Dal confronto di questi tre grafici risulta evidente il miglioramento della qualità dell'aria in presenza di un dispositivo di ventilazione meccanica controllata, considerando che tramite dei sensori viene assicurato il ricambio di aria quando questa è satura di anidride carbonica e ciò impedisce ai livelli di concentrazione di arrivare alle soglie critiche.

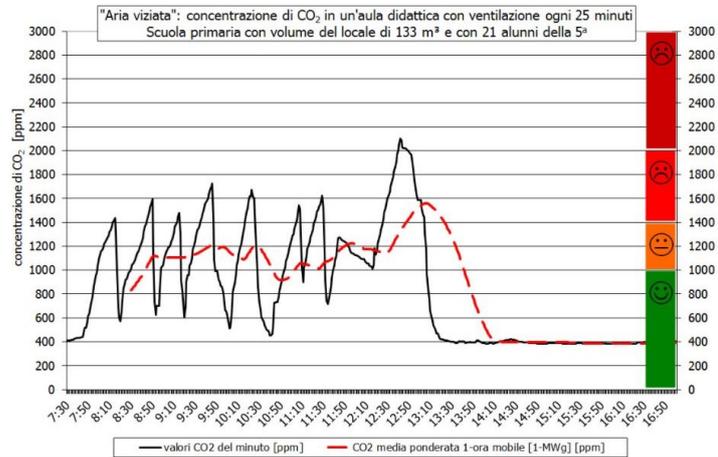


Figura 14: Livelli di CO₂ con ricambio di aria ogni 20/25 min [fonte: vedi nota 75]

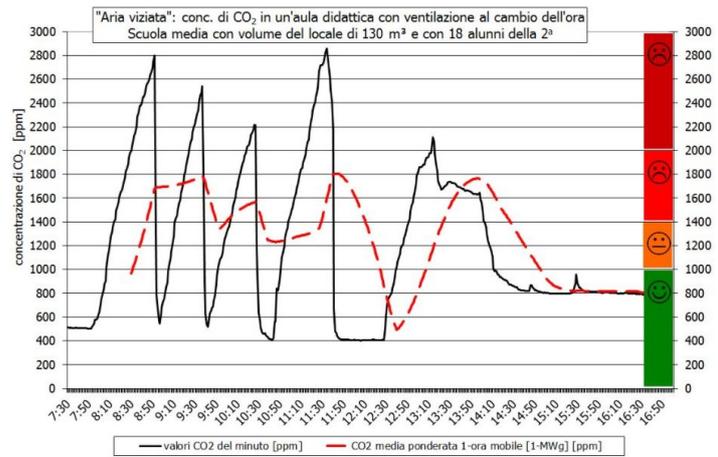


Figura 15: Livelli di CO₂ con ricambio di aria al cambio lezione [fonte: vedi nota 75]

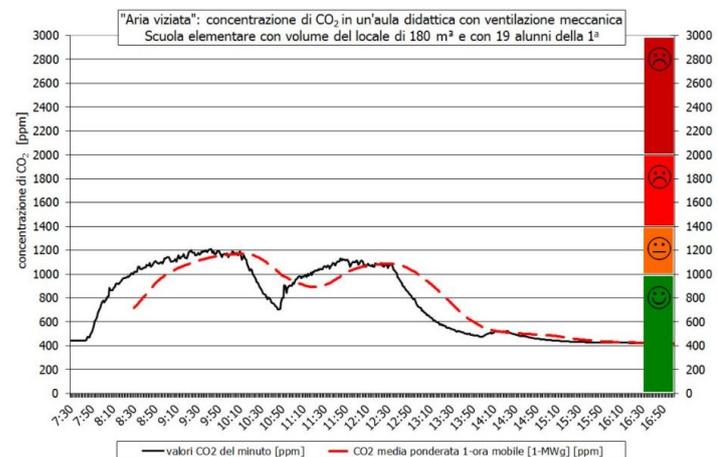


Figura 16: Livelli di CO₂ in un'aula con VMC [fonte: vedi nota 75]

2.1.2. La ventilazione naturale

La ventilazione naturale sfrutta le differenze di pressione che circondano l'edificio, causate dalla pressione ventosa, da possibili effetti "camino" e dal differenziale di temperatura tra interno ed esterno. Il vantaggio di questo tipo di ventilazione è che la sua gestione è relativamente semplice se le chiusure trasparenti sono state progettate correttamente, tuttavia non è possibile avere un controllo sulle portate e sul carico di inquinanti in entrata. Il maggiore svantaggio è rappresentato dalla notevole dispersione termica in regime tardo-autunnale e tardo-primaverile, essendo l'edificio scolastico non in uso nella stagione estiva. In particolare, possiamo dire che la ventilazione naturale è funzione di tre parametri climatici:

- La velocità del vento;
- La direzione del vento;
- La differenza di temperatura.

La direzione e la velocità del vento variano in base alla localizzazione dell'edificio, alla giornata e alla stagione. In Italia la direzione di provenienza del vento è molto variabile e dipende fortemente da fattori locali, come l'andamento orografico che ha effetti sia come elemento incanalatore che come barriera. Il moto dell'aria è accelerato o rallentato dalla forma, orientamento e pendenza del terreno, comportando notevoli variazioni a scala micro-locale.

Nel contesto urbano il regime naturale dei venti varia a causa della presenza di edifici che ne modificano velocità e turbolenza, perciò è difficile farne una valutazione precisa: attorno all'edificio si genera un campo di pressione ventosa che risulta in sovrappressione sul lato controvento e in depressione sul lato opposto. È possibile sfruttare questa differenza di pressione sui due lati opposti e generare una buona ventilazione nell'edificio mettendo in comunicazione attraverso gli infissi interni i vari locali, ma ciò comporta al contempo problematiche di tipo acustico. All'interno e all'esterno degli ambienti si possono avere temperature diverse nei vari periodi di utilizzo; grazie al principio fisico della stratificazione verso l'alto dell'aria calda possiamo avere differenze di pressione che generano movimenti e ricambi dell'aria all'interno degli ambienti.

La strategia di ventilazione naturale si genera perciò attraverso l'apertura di porte e finestre e la sua efficacia dipende essenzialmente da tre fattori:

- La tipologia e posizione delle aperture esterne dell'edificio;

- La disposizione e la morfologia dell'edificio rispetto al contesto esterno;
- La morfologia interna dell'edificio.

La ventilazione si innesca in quattro modi differenti:

- Per infiltrazione;
- Per effetto camino;
- Per induzione dal vento;
- Combinata.

La ventilazione per infiltrazione si verifica a causa della tenuta dei serramenti, nello specifico dal grado di tenuta all'aria dei giunti tra vetro e telaio, dalle ante dell'infisso, ma soprattutto dalla giunzione tra l'infisso stesso e la parete e dipende anche dall'eventuale permeabilità all'aria delle strutture opache costituite da pareti, solai e copertura. A causa della differenza di pressione e di temperatura tra interno ed esterno si generano dei flussi d'aria.

L'effetto camino è invece generato dalla stratificazione verticale dell'aria a diverse temperature. L'aria calda, meno densa, sale verso l'alto al contrario della fredda che rimane in basso. Questa differenza genera un gradiente di pressione che diventa utile per innescare una ventilazione ascendente e si può attivare anche in assenza di vento. Per generare un flusso di aria sufficiente per il ricambio può bastare una differenza di temperatura Δt tra uno e tre gradi centigradi e una limitata altezza del camino termico h compresa tra un metro e mezzo e tre metri, mentre per ottenere dei raffrescamenti ventilativi significativi nei giorni caldi è necessario avere differenze di temperatura e di altezza decisamente superiori⁷⁷. Questo effetto è particolarmente sfruttato durante la stagione estiva per il raffrescamento notturno, quando si ha una notevole differenza di temperatura tra interno ed esterno. Affinché si inneschi questo processo naturale di scambio dell'aria è necessario che vi sia almeno un'apertura posta in sommità dell'edificio e un'altra alla base dello stesso, in modo da garantire un movimento dell'aria continuo.

⁷⁷ Ricciu, R (2012-13), *L.I. di progettazione tecnica e strutturale 2012-13 - La ventilazione*, Università degli studi di Cagliari, Facoltà di Architettura. Disponibile all'indirizzo: https://people.unica.it/robertoricciu/files/2013/04/2013_04_17_La-ventilazione.pdf, consultato il 18/07/2021

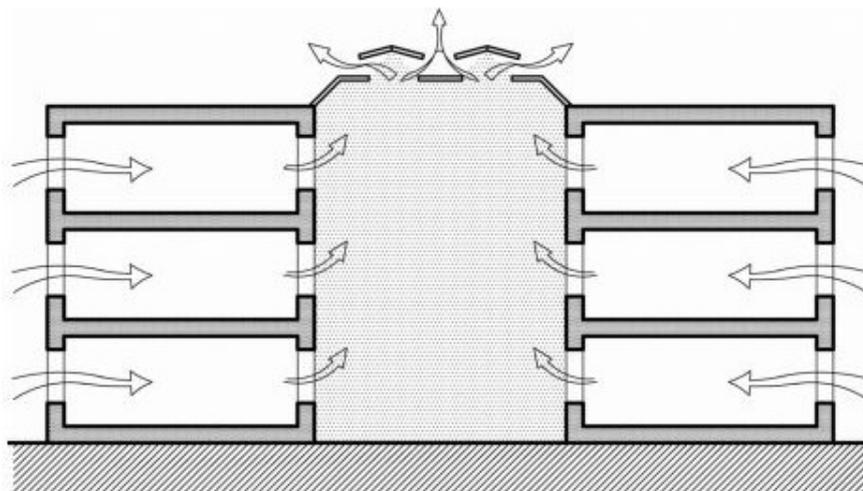


Figura 17: Ventilazione effetto camino [fonte: vedi nota 78⁷⁸]

La ventilazione indotta dal vento sfrutta condotti ad hoc oppure porte e finestre. Dipendentemente da come sono poste le aperture la ventilazione può essere a lato singolo o passante orizzontale. Quella a lato singolo deriva da aperture poste su un'unica parete con conseguente discontinuità del flusso d'aria che risulta strettamente legato alle variazioni di velocità e direzioni dei venti. Nel caso in cui sia presente una singola apertura come si vede in figura 19⁷⁹, la portata d'aria potrebbe essere non sufficiente a ventilare l'ambiente. Se ve ne sono di più potrebbe aumentare grazie al flusso del vento oppure all'effetto camino nel caso di posizionamento su diverse altezze o differenza di temperatura tra interno ed esterno.

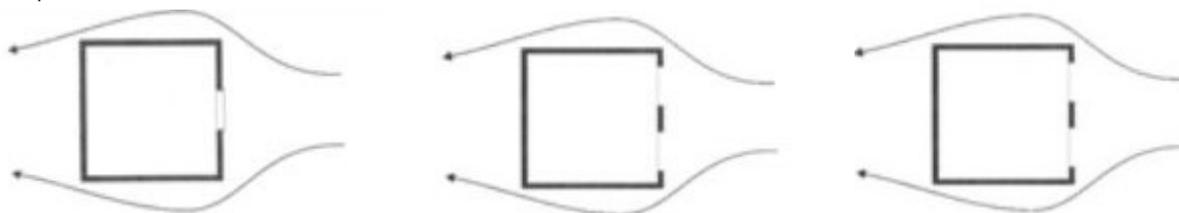


Figura 18: Ventilazione con aperture poste sulla stessa parete [fonte: vedi nota 79]

La passante orizzontale si innesca con aperture disposte su pareti opposte ma alla stessa altezza; la portata d'aria è legata all'area netta di apertura, all'angolo di incidenza del vento

⁷⁸ Fotache, G - *Qualità dell'ambiente interno e comportamento energetico di un edificio adibito ad uffici – applicazione della EN 16798-1* – Tesi di laurea magistrale, Politecnico di Torino, A.A. 2018/2019, Relatore: Corrado V

⁷⁹ Giachetta, A (2005), *Corso di progettazione bioclimatica – modulo: tecnologie bioclimatiche - Raffrescamento passivo e controllo della ventilazione in ambienti confinati* - Università di Genova, facoltà di Architettura. Disponibile al link <https://architettura.unige.it/did/12/architettura/quarto0506/progettbioclimatica/matdid/32.pdf>, consultato il 18/07/2021

rispetto al piano dell'apertura e alla differenza di pressione tra le due aperture⁸⁰. Questo tipo di ventilazione è detta anche incrociata ed il flusso è normalmente orizzontale. Non è necessario che le aperture siano poste nei due lati sopravvento e sottovento anche se, in questo caso, l'effetto potrebbe risultare maggiore. La migliore distribuzione del flusso d'aria si ottiene con aperture disposte diagonalmente nell'edificio e senza troppi ostacoli negli ambienti interni.

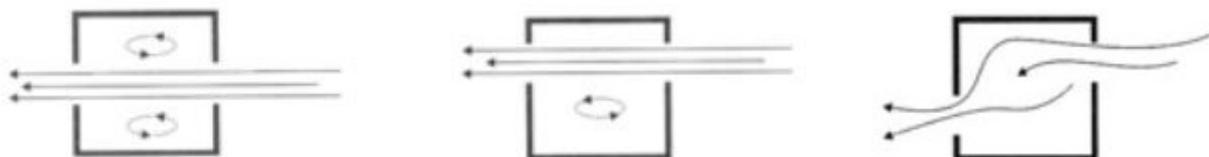


Figura 19: Ventilazione a flusso orizzontale [fonte: vedi nota 79]

Inoltre, è possibile innescare la ventilazione anche senza ricorrere all'apertura di porte e finestre, ma tramite delle apposite bocchette. Questo sicuramente implica dei vantaggi: l'apertura delle finestre comporta l'entrata di rumore e luce che non sempre risulta positivo; tramite le bocchette, invece, la luce non entra e, in caso di inserimento di appositi sistemi di abbattimento acustico, anche il rumore viene attutito. Tuttavia, questo sistema non rappresenta una soluzione per la riduzione degli inquinanti. Tali bocchette sono utili per ventilare intercapedini o vespai all'interno dell'edificio in corrispondenza di cavedi che generano l'effetto camino, e/o sulla sommità dei serramenti⁸¹.

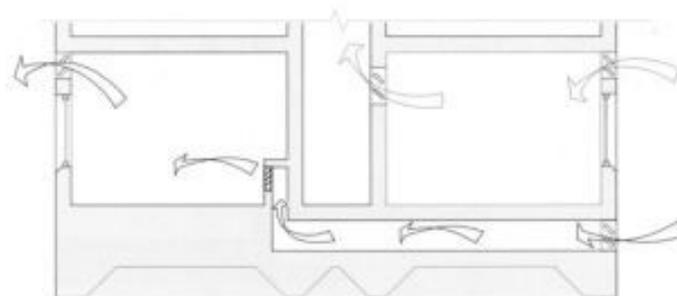


Figura 20: Ventilazione tramite bocchette [fonte: vedi nota 78]

⁸⁰ Ibidem, nota 77

⁸¹ Raisa, V & Schiavon, S & Zecchin, R (2010), *Teoria e tecnica della ventilazione: soluzioni per l'edilizia residenziale e per il piccolo terziario*, Delfino, Milano, pp.92-108

Spirandelli, B (2020), *Progettare edifici passivi con materiali naturali*, Legislazione tecnica, Roma, pp. 124-130

2.1.3. La ventilazione meccanica controllata

La ventilazione meccanica controllata è un sistema impiantistico che garantisce l'immissione controllata di aria negli ambienti ed è in grado di ridurre i livelli di inquinanti interni fino al 70%⁸². Il fine è garantire che vi sia un ricambio di aria pulita costante durante l'intero arco della giornata senza gravare in quantità significative sulla dispersione termica dell'edificio⁸³. Quindi devono essere garantite le portate minime imposte da normativa; si propone un confronto tra il DM 18-12-1975, la UNI 10339 del 95 e l'attuale 16798 del 2019, in quest'ultima non si ragiona più per tipologia di scuola ma per categoria riferita alla qualità dell'ambiente interno.

Destinazione d'uso	Decreto Ministeriale 18/12/1975	Norma UNI 10339 del 1995	Norma UNI EN 16978 del 2019	
	Aria esterna (m ³ /h per persona)	Aria esterna (m ³ /h per persona)	Categoria	Aria esterna (m ³ /h per persona)
Asili nido e scuole materne	15	14,4	IV Categoria	9
Scuole elementari	15	18	III Categoria	14
Scuole medie inferiori	20	21,6	II Categoria	25
Scuole medie superiori	30	25,2	I Categoria	36

Tabella 23: Normative sulle portate d'aria a confronto [fonte: DM 18/12/75, UNI 10339 e UNI EN 16798]

Un livello di qualità normale è definito come Medio e corrisponde alla categoria II, il livello Alto alla categoria I e viene utilizzato quando sono presenti occupanti con particolari necessità, mentre il Basso, categoria IV non implica rischi per la salute ma diminuisce la sensazione di comfort. Per quanto riguarda i dispositivi le possibilità sono essenzialmente due: la VMC puntuale o la VMC canalizzata. In entrambi i casi è necessario, per via delle particolari esigenze dell'edilizia scolastica, che siano rispettate le condizioni di velocità di installazione, limitate opere murarie, silenziosità delle macchine e ottima efficienza a livello

⁸² Busa, L (2020), *Progettare l'aria: Salute e salubrità negli ambienti indoor*, Maggioli Editore, Santarcangelo di Romagna, p. 33

⁸³ Spirandelli, B (2020), *Progettare edifici passivi con materiali naturali*, Legislazione tecnica, Roma, p.115

di filtrazione e recupero del calore. Per quanto riguarda la VMC puntuale, si installa sulla parete perimetrale all'interno degli ambienti stessi in cui è necessaria, i vantaggi associati sono sicuramente una migliore velocità e facilità di installazione e una rumorosità molto bassa; tuttavia, può essere di notevole impatto visivo e la macchina è dimensionata per il solo ambiente, o al massimo due, in cui viene installata. Il costo dipende dalla volumetria della stanza e dalla portata di ricambio da assicurare considerando inoltre il grado di affollamento. La VMC canalizzata invece presenta un vantaggio economico se si devono ventilare molti locali e la possibilità di inserire un sistema di sanificazione dell'aria a ionizzazione centralizzato. L'opera risulta sicuramente più complessa ed avendo un livello di rumore leggermente più alto rispetto a quella puntuale⁸⁴, va installata nei suoi componenti principali in ambienti in cui non vi sono lezioni frontali come, ad esempio, i corridoi e/o locali di servizio; è inoltre possibile ovviare al problema dotando il sistema di silenziatori che agiscono sugli elementi diffusori (griglie di ventilazione).

Il sistema di ventilazione meccanica controllata si può configurare principalmente secondo due tipologie di funzionamento: a mono-flusso o a doppio flusso. Nella tipologia a doppio flusso l'impianto è dotato di un recuperatore di calore che permette all'aria in ingresso di assorbire gran parte dell'energia termica da quella espulsa, conseguentemente si riducono notevolmente i consumi generati dall'impianto di riscaldamento esistente. L'efficienza di questo sistema dipende sostanzialmente dal rendimento del recuperatore di calore. Uno dei principali vantaggi è che il ricambio di aria è costante e regolabile nel tempo, garantendo "scientificamente" il rispetto dei requisiti minimi di ricambio aria e salubrità. L'efficace funzionamento dell'impianto dipende sia dal dimensionamento dello stesso sia dal posizionamento corretto delle bocchette di mandata ed estrazione, che devono essere poste ad una distanza e ad un'altezza predefiniti in sede progettuale; se così non fosse potrebbero crearsi dei cortocircuiti nei movimenti dell'aria e conseguenti zone stagnanti caratterizzate da notevoli quantità di inquinanti. È importante quindi che il

⁸⁴ A prova di ciò è possibile confrontare due diversi modelli di VMC della Wavin: la VMC puntuale VENTIZA EDU (portata massima 920 m³/h) ha un livello di potenza sonora pari a 36 dB(A) mentre la UVN8A (portata massima 3500 m³/h) arriva anche a 60 Db(A). Le specifiche tecniche sono sui cataloghi ai link <https://www.wavin.com/it-it/wavin-ventiza-edu> e <https://www.wavin.com/it-it/catalogo/ventilazione/vmc-non-residenziale-ventiza/unita-di-ventilazione-ad-efficienza-standard?f=etimclassname%3dUnit%C3%A0%20di%20recupero%20calore%20per%20abitazione%20unifamiliare>, consultati il 18/07/2021

flusso d'aria sia direzionato tramite la creazione di zone di sovrappressione e depressione.

Esistono tre tipologie di ventilazione meccanica:

- A mono-flusso autoregolabile: la portata d'aria è costante e l'aria viziata viene estratta dai locali di servizio (ad esempio nel residenziale dai bagni e dalla cucina); la depressione così generata richiama l'aria dall'esterno che viene immessa nei locali tramite delle apposite bocchette autoregolabili - la circolazione interna è garantita dal passaggio dell'aria sotto le porte o attraverso apposite griglie inserite nelle stesse⁸⁵.
- A mono-flusso igroregolabile: il funzionamento è simile a quella a flusso autoregolabile, ma sia le bocchette di immissione che quelle di estrazione regolano la propria portata in base all'umidità relativa interna tramite dei sensori⁸⁶.
- A doppio flusso: sono presenti due canali, uno per l'immissione ed uno per la ripresa dell'aria, in questo modo si evita la contaminazione tra i due flussi. L'aria in ingresso viene filtrata e trattata ed infine immessa nell'ambiente; inoltre, se è presente un recuperatore di calore, il flusso d'aria in uscita cede l'energia termica al flusso d'aria in entrata, senza che i due fluidi si miscelino, consentendo di abbattere i costi energetici dovuti alla climatizzazione dell'aria in entrata⁸⁷.

Come si può osservare in figura 22, gli impianti a semplice flusso aspirano l'aria interna e, tramite una canalizzazione in cui sono inseriti dei ventilatori, la convogliano verso l'esterno, mentre l'aria entra da apposite bocchette che possono essere installate su serramenti, cassonetti o parete tarate secondo le portate di progetto e dotate di sistemi di abbattimento acustico. Generalmente per gli edifici residenziali l'aspirazione avviene negli ambienti come la cucina e il bagno mentre l'immissione nelle camere da letto, per quelli amministrativi l'aspirazione avviene attraverso griglie poste nei corridoi e l'immissione negli uffici. Tramite questa ventilazione è possibile controllare portate e velocità ma si può avere una dispersione di energia durante la stagione fredda e ingresso di aria calda durante l'estate.

⁸⁵ Informazioni tratte da <https://www.vmcgroup.it/semplice-flusso-autoregolabile-canalizzato>, consultato il 20/07/2021

⁸⁶ Informazioni tratte da <https://www.vmcgroup.it/semplice-flusso-igroregolabile-canalizzato>, consultato il 20/07/2021

⁸⁷ Informazioni tratte da <https://www.vmcgroup.it/doppio-flusso-con-recupero-calore>, consultato il 20/07/2021

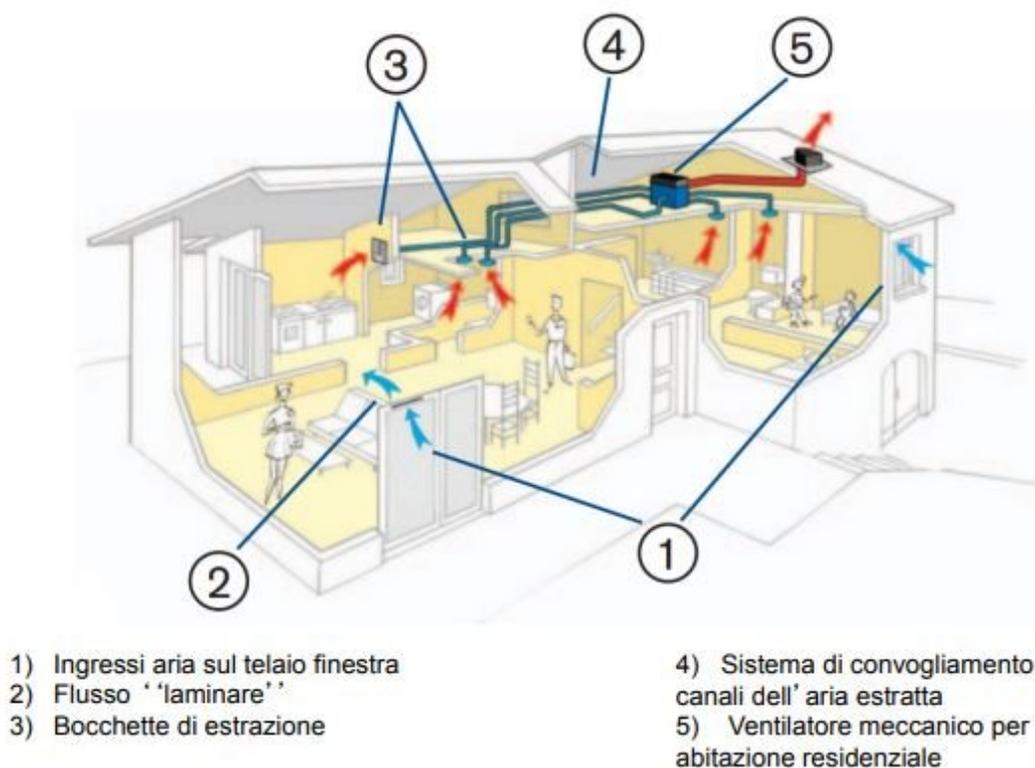


Figura 21: Schema di funzionamento della VMC a semplice flusso [fonte: vedi nota 77]

La ventilazione a doppio flusso invece si basa su un impianto avente diversi canali di distribuzione, uno per l'immissione e l'altro per l'estrazione. I due condotti sono gestiti da due diversi ventilatori elettrici ed oltre a fornire il corretto ricambio di aria, sono dotati di sistemi di filtraggio e, se previsto, anche di un recuperatore di calore che può riscaldare o raffreddare l'aria immessa a seconda delle necessità. Conseguentemente un impianto dotato di recuperatore di calore porta i seguenti vantaggi: l'immissione della corretta quantità di aria ad una velocità giusta, una qualità dell'aria maggiore grazie al filtro e l'abbattimento delle dispersioni termiche per ventilazione. Più precisamente il core dell'impianto di VMC è una macchina ventilante a doppio flusso che immette aria pulita nell'ambiente ed estrae quella esausta; in presenza di uno scambiatore di calore, di tipo statico o entalpico a maggior efficienza, il flusso uscente cede calore all'aria fredda pulita entrante nell'ambiente (figura 23⁸⁸).

⁸⁸ Ferrarini, M (2018), *VMC: sei motivi per sceglierla*, disponibile all'indirizzo <https://www.ediltecnico.it/56631/vmc-ventilazione-meccanica-controllata/>, consultato il 22/07/2021

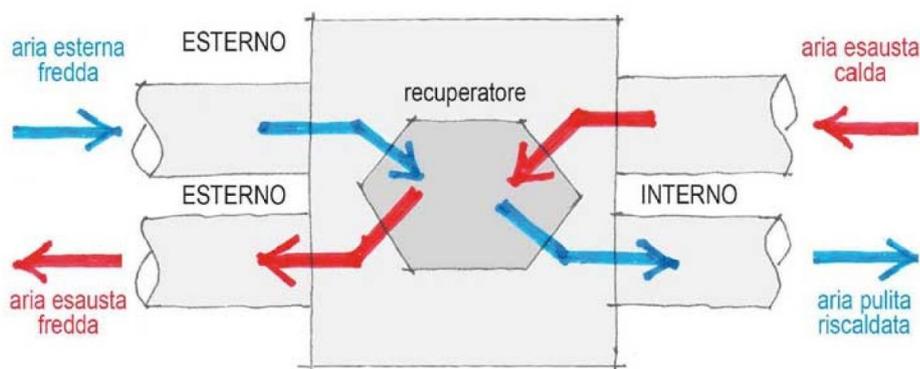


Figura 22: Funzionamento del recuperatore di calore [fonte: vedi nota 88]

Di seguito due rappresentazioni di impianti con e senza recuperatore di calore in una scuola: nel primo caso le canalizzazioni si riconducono nello stesso dispositivo per lo scambio di calore, nel secondo sono presente due dispositivi separati con canalizzazione di entrata e uscita che si introducono in macchinari diversi.

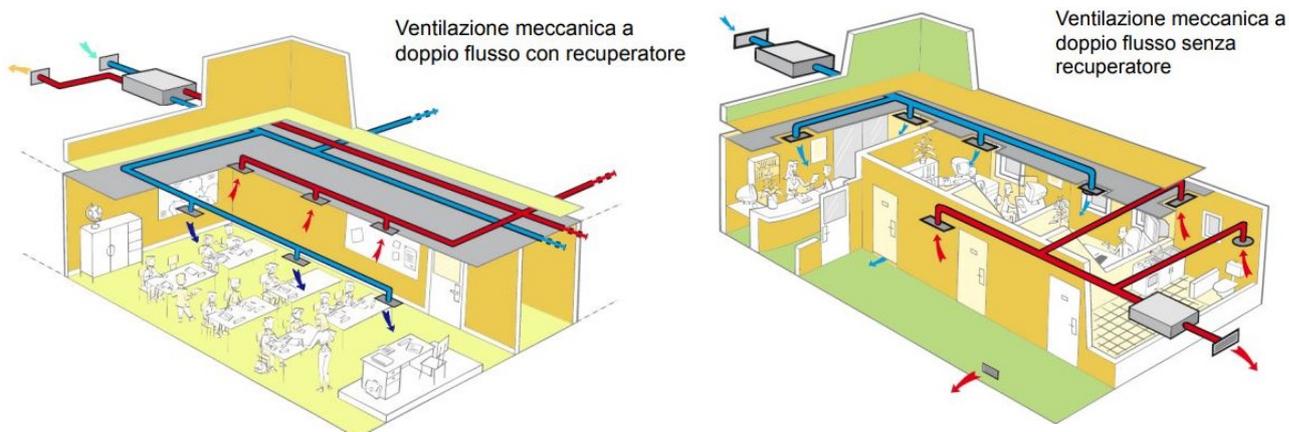


Figura 23: Ventilazione a doppio flusso con e senza recuperatore di calore [vedi nota 77]

Il rendimento del recuperatore dipende da vari fattori, tra cui l'umidità relativa dell'aria di estrazione, la portata, la differenza di temperatura tra aria esterna (immissione) e aria interna (espulsione) e la tipologia del recuperatore. Più precisamente il funzionamento di un impianto di VMC centralizzata prevede che sia aspirata aria dall'esterno, filtrata e che recuperi il calore tramite lo scambiatore. La purificazione dell'aria proveniente dall'esterno avviene tramite i filtri antiparticolato presenti nell'impianto - regolamentati dalla più recente

UNI ISO 16798⁸⁹ - e risulta efficace nel trattenere anche le particelle più piccole e potenzialmente dannose. La distribuzione avviene attraverso le canalizzazioni di centrale che fuoriescono dal dispositivo con l'aria riscaldata e purificata, si immettono nel plenum e nel deumidificatore per poi essere divise in canali più piccoli che ventilano ogni ambiente. Si definisce “plenum” un tratto di canalizzazione dove la velocità dell'aria risulta sufficientemente bassa da non creare notevoli differenze di pressione, la sua funzione è quella di attenuare il flusso turbolento prima che l'aria venga introdotta nelle singole canalizzazioni⁹⁰.

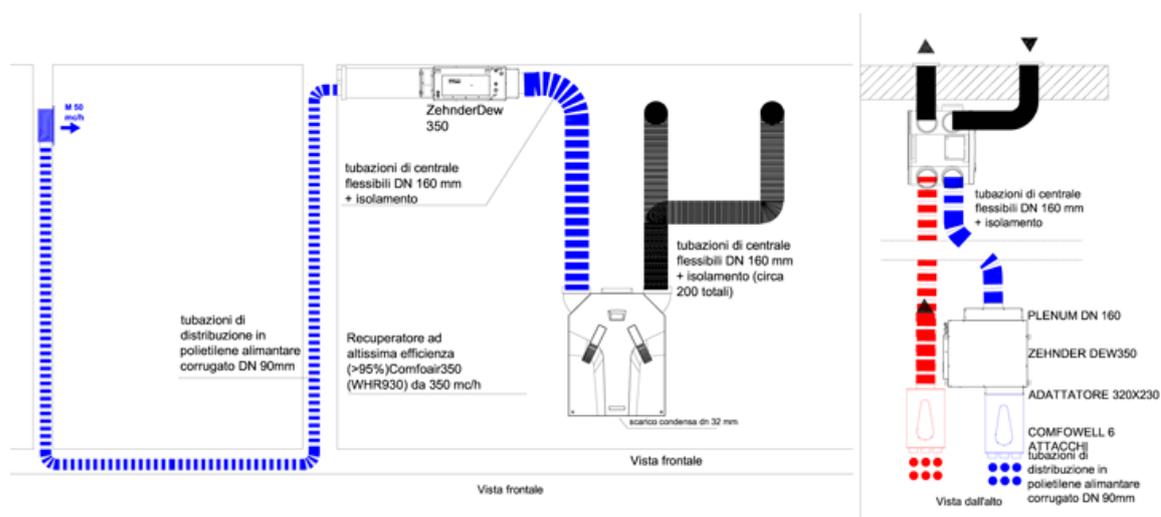


Figura 24: Schema di funzionamento di un impianto VMC con recuperatore di calore [fonte: Zehnder Group]

In alternativa, sono attualmente presenti in commercio dei dispositivi di ventilazione meccanica controllata non centralizzati con recuperatore di calore, per cui valgono gli stessi vantaggi delle macchine a doppio flusso ma con l'ulteriore beneficio di poter installare il dispositivo nell'ambiente stesso in cui è necessario; ciò garantisce il corretto ricambio d'aria senza ricorrere ad una canalizzazione che potrebbe risultare complicata in alcuni edifici esistenti. In alcuni casi le macchine sono state progettate appositamente per le aule scolastiche e possono essere tenute a vista senza doverle nascondere in armadi o altro⁹¹.

⁸⁹ UNI EN 16798-1:2019 - *Prestazione energetica degli edifici - Ventilazione per gli edifici - Parte 1: Parametri di ingresso dell'ambiente interno per la progettazione e la valutazione della prestazione energetica degli edifici in relazione alla qualità dell'aria interna, all'ambiente termico, all'illuminazione e all'acustica - Modulo M1-6*

⁹⁰ Stefanutti, L, direzione e coordinamento di, (2007), *Manuale degli impianti di climatizzazione*, Tecniche Nuove, Milano, cap. 20 pp. 80-81

⁹¹ Wavin Italia S.p.A. ha creato una linea appositamente per gli edifici scolastici che può essere tenuta a vista nelle aule, le informazioni complete sono disponibili al link <https://www.wavin.com/it-it/news/news/wavin-italia-presenta-l%E2%80%99unit%C3%A0-di-ventilazione-per-istituti-scolastici-ventiza-edu>, consultato il 25/07/2021

Negli edifici scolastici i livelli di inquinanti non sono costanti ma variano in base al grado di occupazione dell'ambiente e alle condizioni esterne, quindi sarà necessario installare un dispositivo di ventilazione con portate di immissione d'aria regolabili per riuscire a gestire al meglio i momenti di picco. Per stabilire durante l'occupazione se i livelli di inquinanti sono nella norma oppure hanno superato il valore limite, si può ricorrere all'installazione di sensori che rilevano i valori delle tre categorie di inquinanti precedentemente esposte e pilotano la regolazione della velocità dell'aria, aumentandola nel caso in cui i valori debbano essere riportati al di sotto degli standard.

2.1.4. La ventilazione ibrida

Per ventilazione ibrida si intende un sistema di ricambio aria *indoor* che somma la ventilazione naturale e quella meccanica combinando i vantaggi di entrambe. Gli utenti possono aprire e chiudere le finestre avendo così un diretto controllo sul sistema, supportato al bisogno dal funzionamento della VMC. Lo scopo è di non eliminare del tutto la ventilazione naturale e di ricorrere alla meccanica solo in alcune situazioni in dipendenza della stagione o se le condizioni metereologiche sono sfavorevoli, ad esempio molto vento o pioggia. In stagioni come quelle pre-autunnale o primaverile sarà possibile utilizzare la ventilazione naturale, mentre in stagioni più estreme come quella invernale o estiva si potrà ricorrere all'utilizzo della meccanica⁹².

Non esiste una strategia di ventilazione migliore, ognuna presenta dei vantaggi e degli svantaggi (Tab. 24). È necessario tenere conto di alcuni fattori globali come il clima esterno, la qualità dell'aria interna in relazione al carico massimo di affollamento, le portate entranti, la temperatura, l'umidità, la velocità dei venti e inoltre anche la localizzazione dell'edificio. Se l'edificio in questione si trova in una zona molto inquinata, affidarsi ad una ventilazione naturale non è un'ottima scelta per la quantità di sostanze nocive che possono entrare; se per esempio se il clima è molto rigido, l'apertura delle finestre può causare fuoriuscita di calore e il conseguente aumento dell'utilizzo dei sistemi di riscaldamento o, all'opposto, entrata di aria calda in stagione tardo-primaverile che incrementerebbe la necessità di raffrescamento. Sicuramente la ventilazione naturale, ove possibile, ha il vantaggio di non avere costi di installazione e manutenzione e permette il ricambio di aria ogni qualvolta lo si desidera; tuttavia, può ridurre i livelli di comfort termo-acustici e aumentare le dispersioni ed inoltre non è possibile dirigere i flussi di aria creando zone di alta e bassa pressione. La ventilazione meccanica è invece adattabile a tutti i climi, non è direttamente controllabile dagli utenti ed ha sicuramente un sostanziale costo di investimento iniziale e di manutenzione; al contempo favorisce il risparmio in termini di consumi energetici per riscaldamento e raffrescamento degli ambienti. Il sistema ibrido, che può rappresentare in molti casi la soluzione migliore, presenta delle difficoltà notevoli nella progettazione del comportamento energetico dell'edificio essendo influenzato dalle scelte variabili dell'utenza (apertura e chiusura delle finestre in maniera incontrollata).

⁹² Raisa, V & Schiavon, S & Zecchin, R (2010), *Teoria e tecnica della ventilazione: soluzioni per l'edilizia residenziale e per il piccolo terziario*, Delfino, Milano, p. 112

Infine, la scelta della tipologia di ventilazione può essere influenzata anche da esigenze acustiche, soprattutto se si tratta di edifici scolastici, dove di primaria importanza è la comprensione tra alunni e insegnanti. Se la scuola è situata vicino a fonti di rumore il livello di disturbo esterno risulta molto alto durante il giorno; in questo caso diventa sconsigliabile l'utilizzo della sola ventilazione naturale che permette al rumore di entrare. Se viene installato un dispositivo di ventilazione meccanica controllata è necessario progettare adeguatamente l'impianto, in particolare sia la velocità dei ventilatori sia il flusso d'aria ai terminali, come bocchette e diffusori, che devono essere dimensionati in funzione della portata d'aria in modo da limitare la velocità in uscita e conseguentemente la potenza sonora emessa. Nel caso in cui il rumore emesso risulti ancora fastidioso è possibile installare dei silenziatori.

Ventilazione	Vantaggi	Svantaggi
Naturale	<ul style="list-style-type: none"> • Possibilità di ricambio di aria quando lo si richiede; • Nessun costo di installazione e manutenzione; • Controllo diretto degli utenti; • Utilizzo in climi caldi e moderati. 	<ul style="list-style-type: none"> • Dipende da condizioni climatiche esterne; • Non è possibile direzionare i flussi; • Entrata di rumore esterno e luce indesiderati; • Non c'è filtraggio dell'aria; • Dispersione di calore/raffrescamento durante le stagioni estreme.
Meccanica	<ul style="list-style-type: none"> • Controllo della temperatura dell'aria e dell'umidità; • Filtraggio degli inquinanti; • Impedisce l'entrata di rumore esterno; • Parzialmente controllabile dagli utenti. 	<ul style="list-style-type: none"> • Costo di installazione e manutenzione; • Possibile blocco del sistema; • Rumore derivante dal macchinario.
Ibrida	<ul style="list-style-type: none"> • Potenziale risparmio di energia se correttamente progettata; • Flessibilità di controllo; • Utilizzabile in tutti i tipi di clima. 	<ul style="list-style-type: none"> • Progettazione molto complessa; • Costo di installazione e manutenzione.

Tabella 24: Confronto tipologie di ventilazione

[fonte: mia rielaborazione dalla pubblicazione WHO - *Natural Ventilation for Infection Control in Health-Care Settings*⁹³]

⁹³ WHO, (2009), *Natural Ventilation for Infection Control in Health-Care Settings*. Disponibile all'indirizzo: https://www.who.int/water_sanitation_health/publications/natural_ventilation.pdf, consultato il 27/07/2021

2.2. Metodi di progettazione per la qualità dell'aria

A seguito delle analisi riguardanti la salubrità dell'aria all'interno degli ambienti e affinché sia ottimale la progettazione del comfort *indoor*, la norma UNI EN 16798⁹⁴ indica tre metodi per determinare la qualità dell'aria interna:

- Metodo 1: basato sulla qualità dell'aria percepita;
- Metodo 2: usa i valori limite della concentrazione di sostanze inquinanti;
- Metodo 3: basato sulle portate di ventilazione predefinite.

Il metodo 1 si basa sull'individuazione del tasso di ventilazione più alto tra quello necessario alla riduzione dei rischi per la salute relativo ad uno specifico inquinante ed il tasso richiesto per ottenere il livello di qualità dell'aria indoor nella categoria desiderata. La portata totale è ottenuta sommando la ventilazione per diluire e/o rimuovere gli inquinanti generati dalle persone e la ventilazione per rimuovere e/o diluire gli inquinanti prodotti dall'edificio e dagli impianti, secondo l'equazione.

$$q_{tot} = n * q_p + A_r * q_b \quad (7)$$

Dove:

- q_{tot} è il tasso totale di ventilazione per la zona di respirazione, in [l/s]
 n è il valore di progetto per il numero di persone presenti nell'ambiente
 q_p è il tasso di ventilazione per l'occupazione per persona, in [l/s per persona]
 A_r è l'area del pavimento, in [m²]
 q_b è il tasso di ventilazione per le emissioni dall'edificio, in [l/s per m²]

Per gli edifici non residenziali i livelli di qualità dell'aria percepita sono predefiniti per quelle persone che non sono in grado di adattarsi facilmente a condizioni diverse. Il tasso di ventilazione dipende dalla densità di occupazione e dalla tipologia dell'edificio, definito poco inquinante se la maggior parte dei materiali da costruzione utilizzati sono basso-emissivi e l'attività degli occupanti non risulta inquinante. Nella tabella sono indicati i tassi di ventilazione q_p necessari per la diluizione o la rimozione degli inquinanti prodotti dagli occupanti, per motivi di salute è necessario garantire che il tasso minimo sia pari a 4 l/s per persona.

⁹⁴ UNI EN 16798-1:2019 - *Prestazione energetica degli edifici - Ventilazione per gli edifici - Parte 1: Parametri di ingresso dell'ambiente interno per la progettazione e la valutazione della prestazione energetica degli edifici in relazione alla qualità dell'aria interna, all'ambiente termico, all'illuminazione e all'acustica - Modulo M1-6*

Categoria	Percentuale attesa insoddisfatta [%]	Flusso d'aria per persone non adattabili [l/s*pers]
I	15	10
II	20	7
III	30	4
IV	40	2,5

Tabella 25: Tassi di ventilazione per adulti sedentari, persone non adattabili, per la diluizione delle emissioni (bio-effluenti) delle persone per le differenti categorie [fonte: UNI EN 16798]

I valori dei tassi di ventilazione necessari a ridurre o rimuovere gli inquinanti prodotti dagli edifici e dagli impianti sono indicati nella tabella 26, i valori in grassetto rappresentano le soglie consigliate dall'Organizzazione Mondiale della Sanità, al di sotto di queste la qualità può essere compromessa.

Categoria	Edificio poco inquinante [l/s*m ²]	Edificio molto poco inquinante [l/s*m ²]	Edificio non inquinante [l/s*m ²]
I	0,5	1,0	2,0
II	0,35	0,7	1,4
III	0,2	0,4	0,8
IV	0,15	0,3	0,6

Tabella 26: Tassi di ventilazione per diluire le emissioni dalle differenti tipologie di edificio [FONTE: UNI EN 16798]

Nel caso in cui siano presenti delle sorgenti inquinanti critiche per la salute è necessario rimanere al di sotto delle soglie indicate nel metodo 2.

Con il secondo metodo vengono calcolati i tassi di ventilazione necessari per diluire una singola sostanza secondo l'equazione.

$$Q_h = \frac{G_h}{C_{h,i} - C_{h,0}} * \frac{1}{\varepsilon_v} \quad (8)$$

Dove:

Q_h è il tasso di ventilazione necessario per la diluizione, in [m³/s]

G_h è il tasso di generazione di una sostanza, in [mg/s]

$C_{h,i}$ è la concentrazione di inquinanti nella zona occupata dalle persone, in [mg/m³]

$C_{h,0}$ è la concentrazione di inquinanti nell'aria immessa, in [mg/m³]

ε_v è l'efficacia della ventilazione

I valori di riferimento relativi agli inquinanti per le zone occupate e all'efficacia della ventilazione si possono trovare direttamente nel testo della UNI EN 16798. Dall'equazione si evidenzia che:

- All'aumentare dell'efficienza di ventilazione la portata di aria esterna necessaria diminuisce, a parità di contaminante prodotto in ambiente.
- La portata di aria esterna Q_h aumenta al diminuire della differenza tra la concentrazione degli inquinanti nell'aria dell'ambiente $C_{n,i}$ e quella nell'aria immessa $C_{n,o}$; quindi più si desidera un ambiente con aria pulita e maggiore è il quantitativo di aria esterna necessaria e più alta è la concentrazione di inquinanti nell'aria esterna e più grande sarà la portata di aria entrante.

Il valore dell'efficienza di ventilazione dipende dal sistema di distribuzione e dalla differenza tra la temperatura dell'aria di mandata e quella nella zona in cui si trovano le persone; questi parametri definiscono il moto dell'aria nell'ambiente e la sua capacità di rimuovere le particelle di inquinanti presenti. I metodi di diffusione dell'aria in un ambiente sono raggruppabili in due categorie:

- *Perfect mixing distribution* o ventilazione con perfetta miscelazione, prevede una completa diluizione degli inquinanti in ambiente con una concentrazione uniforme; questa distribuzione è la più utilizzata dagli impianti di diffusione dell'aria, nei quali l'immissione in ambiente di una certa quantità di aria provoca una movimentazione interna affinché vi sia mescolanza che teoricamente dovrebbe coinvolgere tutto l'ambiente;
- *Perfect displacement distribution* o ventilazione a dislocamento, in cui vi è un fronte d'aria che avanza da un lato verso l'altro dell'ambiente che rimuove i contaminanti durante il suo moto; la concentrazione degli inquinanti varia da un minimo nella zona di immissione ad un massimo nella zona di estrazione, ad esempio viene utilizzato nelle sale operatorie per effettuare una perfetta rimozione di sostanze nel senso del moto dell'aria⁹⁵.

L'equazione 8 è valida sia in regime stazionario che orario, inoltre per questo metodo si richiede che l'aria immessa all'interno degli ambienti abbia una concentrazione di

⁹⁵ De Santoli, L & Mancini, F (2017), *La progettazione degli impianti di climatizzazione*, Maggioli, Santarcangelo di Romagna, pp. 165-180

inquinanti inferiore all'aria interna prelevata; conseguentemente, nel caso di utilizzo di questo approccio, è necessario conoscere tutte le possibili sostanze presenti nell'aria *indoor* e *outdoor*. Questo metodo, definito anche come prestazionale, è in grado quindi di simulare al meglio le condizioni di un ipotetico ambiente; tuttavia, potrebbero esserci delle difficoltà applicative e delle complicazioni dovute:

- Alla presenza di diversi inquinanti, che presentano caratteristiche fisiche diverse e si distribuiscono in maniera differente determinando diversi valori dell'efficienza di ventilazione e quindi anche delle portate d'aria;
- Alla distribuzione e alle caratteristiche delle sorgenti interne possono cambiare se viene modificato il *lay-out* interno degli ambienti;
- All'assenza di dati certi e condivisi delle concentrazioni di inquinanti nell'aria esterna per tutte le località;
- All'assenza di dati precisi e condivisi delle emissioni di inquinanti dei materiali da costruzione o degli elementi di arredo.

Genericamente per edifici molto affollati, possiamo considerare come indicatore di benessere il biossido di carbonio essendone gli individui stessi produttori e sorgente principale. Questa sostanza, anche se non è tossica per l'organismo umano, rappresenta un parametro valido per quantificare le caratteristiche di salubrità dell'aria e l'inadeguatezza della portata di ventilazione. È possibile esprimere la relazione tra la concentrazione di CO₂ e il ricambio dell'aria tramite la seguente espressione:

$$C = C_b + \frac{q}{n \cdot V} \quad (9)$$

Dove:

C è la concentrazione di CO₂ in ambiente interno espressa in ppm

C_b è la concentrazione di CO₂ in ambiente esterno espressa in ppm

q è la quantità di CO₂ prodotta all'interno dell'ambiente espressa in m³/h

n è il numero di ricambi di aria nel volume considerato espresso in 1/h

V è il volume considerato espresso in m³

L'anidride carbonica prodotta dalle attività metaboliche è pari a q_p=20 l/s per persona, quindi sapendo quante persone sono presenti all'interno di un ambiente n_p è possibile calcolare il valore di q come:

$$q = q_p * n_p \quad (10)$$

Mentre possiamo riscrivere il termine $n*V$ come:

$$n * V = n_p * V_p \quad (11)$$

Dove V_p è la portata di ricambio di aria per persona. Quindi andando a sostituire queste due espressioni all'interno dell'equazione si ottiene:

$$C = C_b + \frac{q_p * n_p}{V_p * n_p} \quad (12)$$

Semplificando l'espressione e tenendo presente che sono noti i valori di C_b e q_p , risulta che la concentrazione è inversamente proporzionale al ricambio d'aria per persona. La concentrazione accettabile indoor è di circa 1.000 ppm a cui corrisponde un volume di ricambio di 10 l/s a persona, come si nota dal grafico riportato che mette in relazione la concentrazione di anidride carbonica, espressa come differenza tra quella interna e quella esterna, con la portata di ventilazione.

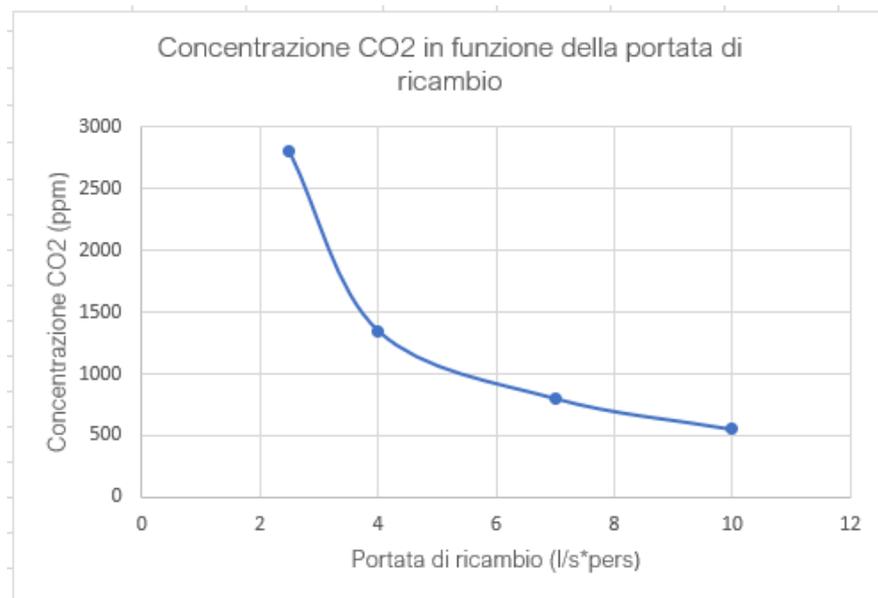


Figura 25: Correlazione tra concentrazione di CO2 e portata di ventilazione [mia elaborazione dalla UNI EN 16798]

Il metodo 3 invece prevede che siano determinati i valori minimi del tasso di ventilazione in relazione alla qualità dell'aria percepita e alla salubrità della zona occupata. Questo metodo prevede che siano presi considerazione uno o più dei seguenti parametri:

- La ventilazione totale di progetto per i componenti dell'edificio (q_{tot});
- La ventilazione di progetto per unità di area di pavimento (q_m^2);
- La ventilazione di progetto per persona (q_p);
- I tassi di ricambio dell'aria di progetto (ach);

- I tassi di ventilazione di progetto per singolo ambiente e per tipologia di edificio (q_{room}).

Con questo metodo il tasso di ventilazione può essere espresso sia in funzione delle persone sia della metratura. Considerando che questo approccio, definito come prescrittivo, individua delle portate minime al di sotto delle quali non è possibile scendere e che quelle calcolate con il metodo prestazionale risultano genericamente più alte, per la progettazione è possibile scegliere un valore intermedio tra i due. I valori delle portate minime da garantire secondo la UNI 16798 sono riportati nella seguente tabella:

Categoria	Aria esterna (m ³ /h per persona)
IV Categoria	9
III Categoria	14
II Categoria	25
I Categoria	36

Tabella 27: Portata di ricambio in base alle categorie [fonte: UNI EN 16798]

Trattandosi di edifici scolastici e considerando che i valori sono circa simili, possiamo prendere come riferimento la tabella presente nella UNI 10339.

2.3. L'influenza della ventilazione sulla dispersione energetica di un edificio

La ventilazione incide in modo determinante sul bilancio energetico di un involucro edilizio ed è per questo che viene posta una sempre maggiore attenzione sulla ricerca di sistemi e tecnologie che possano garantire l'efficienza energetica, limitando per quanto possibile le infiltrazioni d'aria dalle chiusure esterne. Per comprendere al meglio il ruolo della ventilazione, è necessario evidenziare i parametri che determinano il bilancio energetico nell'ottica di garantire il benessere *indoor*. Il comfort termoigrometrico dipende infatti da numerosi fattori, tra cui la temperatura e l'umidità relativa dell'ambiente interno:

- Nella stagione invernale la temperatura interna di progetto deve aggirarsi intorno ai 20°C, mentre l'umidità relativa deve mantenersi circa al 50%;
- Nella stagione estiva la temperatura interna deve essere mediamente prossima ai 26°C e l'umidità intorno al 50%.

È chiaro che in presenza delle condizioni climatiche tipiche invernali o estive e in assenza di un sistema impiantistico non è possibile soddisfare le condizioni di comfort indicate. Per il dimensionamento corretto dell'impianto di riscaldamento è necessario determinare il carico termico invernale, ovvero la potenza termica che l'edificio disperde verso l'ambiente esterno in determinate condizioni di progetto. Tramite questa grandezza è garantito il raggiungimento e il mantenimento della giusta temperatura all'interno dell'ambiente. All'equilibrio, raggiunta la condizione di progetto, si avrà:

$$\Phi_{H,imp}(\tau) = \Phi_{H,nd}(\tau) \quad (1)$$

Dove:

- $\Phi_{H,imp}(\tau)$ è la potenza erogata dall'impianto di riscaldamento [W]
- $\Phi_{H,nd}(\tau)$ è il carico termico invernale dell'edificio [W]

Essendo il carico termico variabile nel tempo, anche la potenza erogata dall'impianto dovrà esserlo e questo deve essere tenuto in considerazione nel dimensionamento di tutti gli elementi di un impianto. Il carico termico invernale è il risultato di un bilancio energetico che tiene in considerazione i seguenti flussi di energia:

- Il flusso scambiato con l'ambiente esterno per trasmissione attraverso l'involucro edilizio $\Phi_{H,tr}(\tau)$

- Il flusso scambiato con l'ambiente esterno per ventilazione attraverso l'involucro edilizio $\Phi_{H,ve}(\tau)$
- I flussi termici dovuti a sorgenti interne all'edificio, quali persone, lampade e apparecchiature $\Phi_{H,int}(\tau)$
- Gli apporti termici solari $\Phi_{H,sol}(\tau)$

Quindi scriviamo l'equazione di bilancio:

$$\Phi_{H,nd}(\tau) = \Phi_{H,tr}(\tau) + \Phi_{H,ve}(\tau) + \Phi_{H,int}(\tau) + \Phi_{H,sol}(\tau) \quad (2)$$

È necessario considerare che i flussi indicati sono variabili nel tempo in funzione di condizioni climatiche e modalità di occupazione differenti. Per il calcolo del carico termico invernale si utilizzano per convenzione con il segno positivo i termini che producono una diminuzione di temperatura dell'ambiente interno. Quindi nell'equazione 2 i primi due termini sono positivi mentre gli altri hanno segno negativo.

La figura 27 rappresenta l'andamento tipico del carico termico invernale di un edificio, questo parte dal valore zero quando inizia la stagione del riscaldamento fino ad arrivare ad un massimo nel pieno della stagione fredda per poi decrescere alla fine di questa. Avendo definito il carico termico come la potenza che deve essere erogata dall'impianto di riscaldamento affinché sia sempre mantenuta la temperatura di progetto, è necessario dimensionare il sistema considerando lo scenario peggiore e quindi individuando il valore massimo della curva.

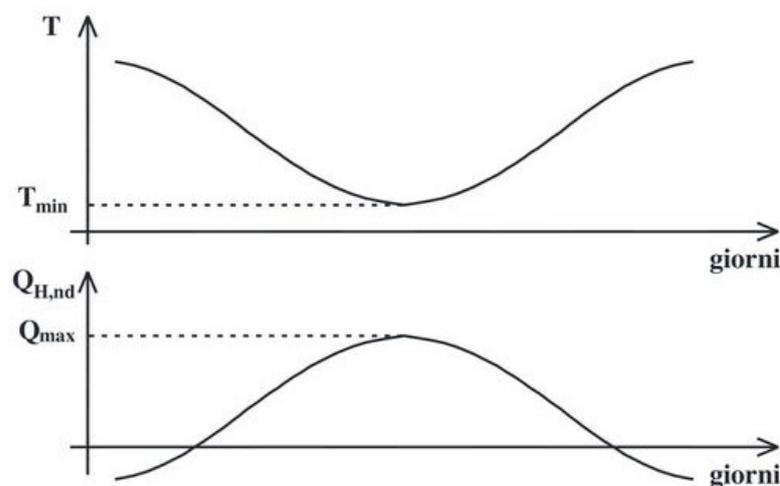


Figura 26: Andamento della temperatura e del carico termico in funzione dei giorni [fonte: vedi nota 95]

Inoltre, per la stagione invernale è possibile apportare delle semplificazioni nel calcolo del carico termico: non vengono calcolati sempre gli apporti delle sorgenti interne e della radiazione solare ma costituiscono un aiuto aleatorio. In regime estivo non è possibile fare questa semplificazione perché questi costituiscono i principali fattori a cui l'impianto deve far fronte. La seconda facilitazione riguarda la temperatura esterna, che risulta essere sempre minore di quella interna e possiamo quindi assumerla come il valore più basso che si raggiunge nell'anno e viene definita temperatura di progetto. Conseguentemente i flussi termici scambiati per trasmissione e per ventilazione non saranno più dipendenti dal tempo e quindi il carico termico invernale risulta:

$$\Phi_{H,nd} = \Phi_{H,tr} + \Phi_{H,ve} \quad (3)$$

Il carico termico per trasmissione, cioè il primo membro dell'equazione 3, può essere espresso tramite la seguente relazione:

$$\Phi_{H,tr} = \sum_j U_j * A_j * \Delta T_j + \sum_k \psi_k * L_k * \Delta T_k \quad (4)$$

Le sommatorie sono estese:

- A tutte le superfici dell'involucro, ciascuna caratterizzata da opportuni valori della trasmittanza U, della superficie A e della differenza di temperatura ΔT ;
- A tutti i ponti termici presenti nell'involucro, ognuno caratterizzato da valori del coefficiente di trasmissione lineica ψ , della lunghezza L e della differenza di temperatura ΔT .

La superficie da considerare per lo scambio termico è quella interna di ciascuna parete e quindi si usano nel calcolo le misure nette interne trascurando lo spessore dei muri e dei solai. Per le aperture, quindi porte, finestre e lucernai, si considera la luce libera dell'apertura praticata nella parete. Per il flusso dovuto allo scambio termico le pareti che vengono prese in considerazione sono quella confinanti con l'esterno, con i locali non riscaldati e con il terreno. Per quanto riguarda lo scambio termico dovuto ai ponti termici, può essere determinato a grandi linee tramite la tabella in figura 28.

Le maggiorazioni, espresse in percentuale, si applicano alle dispersioni della parete opaca e tengono conto anche dei ponti termici relativi ai serramenti.

Descrizione della struttura	Maggiorazione ¹¹⁾
Parete con isolamento dall'esterno (a cappotto) senza aggetti/balconi e ponti termici corretti	5
Parete con isolamento dall'esterno (a cappotto) con aggetti/balconi	15
Parete omogenea in mattoni pieni o in pietra (senza isolante)	5
Parete a cassa vuota con mattoni forati (senza isolante)	10
Parete a cassa vuota con isolamento nell'intercapedine (ponte termico corretto)	10
Parete a cassa vuota con isolamento nell'intercapedine (ponte termico non corretto)	20
Pannello prefabbricato in calcestruzzo con pannello isolante all'interno	30

Figura 27: Maggiorazioni percentuali relative alla presenza di ponti termici [fonte: vedi nota 95]

Il carico termico per ventilazione può essere calcolato tramite la relazione:

$$\Phi_{H,ve} = G_{inf} * c_p * (T_i - T_e) \quad (5)$$

Dove:

- G_{inf} è la portata di aria che entra negli ambienti riscaldati per infiltrazione [kg/s]
- C_p è il calore specifico a pressione costante dell'aria [J/kgK]

La portata in massa di aria esterna può essere valutata ipotizzando un numero di ricambi orari per infiltrazione pari a 0.3 h^{-1} per edifici con infissi nuovi o pari a 0.5 h^{-1} per edifici con infissi vecchi. Considerando che il numero n di ricambi orari rappresenta il rapporto tra il volume d'aria rinnovato in un'ora e il volume dell'ambiente considerato, la portata in massa di infiltrazione può essere calcolata tramite l'espressione:

$$G_{inf} = \frac{n * V}{3600} * \rho \quad (6)$$

In cui ρ rappresenta la massa volumica dell'aria che è pari a 1.2 kg/m^3 . Se è presente un impianto di ventilazione meccanica controllata che garantisce la pressurizzazione degli ambienti, allora G_{inf} può essere posto pari a zero.

Quindi nel caso in cui nell'edificio non vi sia un impianto di VMC e in cui i serramenti non presentino una corretta tenuta all'aria, una parte del carico termico di progetto deve compensare le perdite per ventilazione e di conseguenza l'impianto termico di riscaldamento dovrà essere dimensionato per un carico maggiore. Si stima infatti che la ventilazione incide per una quota variabile tra il 30% e il 50% sul fabbisogno di energia

primaria dell'edificio; quindi, installando dei sistemi per il controllo della ventilazione si avrebbe un risparmio energetico e un vantaggio in termini economici⁹⁶.

⁹⁶ De Santoli, L & Mancini, F (2017), *La progettazione degli impianti di climatizzazione*, Maggioli, Santarcangelo di Romagna, pp.117-127

2.4. Installazione di sistemi di ventilazione meccanica: analisi di alcuni interventi campione

Alla luce dell'emergenza sanitaria, iniziata negli ultimi mesi del 2019, è sempre maggiore l'attenzione riposta sul tema della salubrità e del ricambio dell'aria negli edifici scolastici⁹⁷. Come già detto la criticità era ben nota, ma è stata notevolmente accentuata dalla pandemia, in un contesto ove il problema dei contagi all'interno della popolazione scolastica risulta molto rilevante. Questo paragrafo ha come obiettivo la ricerca di una correlazione, se esiste, tra la tipologia di impianto installato all'interno degli edifici scolastici presi in considerazione e alcuni parametri quali la grandezza della struttura, la sua conformazione, il numero di piani e il totale degli alunni, quando questi dati sono reperibili. I casi riportati sono cinque e saranno esposti in un ordine cronologico relativo all'anno dell'intervento.

Scuola per l'infanzia provinciale Monguelfo (BZ)

La scuola è situata nel Comune di Monguelfo, in provincia di Bolzano. L'edificio è stato costruito nel 1951 ed è stato oggetto di un intervento di ristrutturazione e ampliamento con trasformazione da scuola primaria a scuola dell'infanzia. La struttura è a forma di "C" ed occupa un'area di 830 mq, all'edificio iniziale che si compone di due piani fuori terra ed uno parzialmente interrato, il progetto prevede l'addizione di un volume di un piano all'interno dello spazio racchiuso dalla planimetria a "C". La scuola si compone di vari elementi, dalle aule per la didattica a quelle per le attività speciali come i laboratori di musica e le biblioteche, la palestra, i servizi igienici e gli uffici amministrativi. La disposizione interna presenta il tipico schema aula-corridoio. A livello di contesto urbano l'edificio è inserito vicino all'asse principale stradale del paese, in una zona prevalentemente residenziale. Gli interventi, mirati da una parte a garantire l'efficace assetto distributivo-funzionale e dall'altra a ridurre i consumi energetici, sono stati l'isolamento a cappotto delle pareti e della copertura, l'ampliamento fino alla quota del pavimento della superficie finestrata per sfruttare al massimo gli apporti solari con

⁹⁷ Istituto Superiore di Sanità, (2021), *Indicazioni ad interim per la prevenzione e gestione degli ambienti indoor in relazione alla trasmissione dell'infezione da virus SARS-CoV-2. Aggiornamento del Rapporto ISS COVID-19 n. 5/2020 Rev. 2*, disponibile al link https://www.iss.it/documents/20126/0/Rapporto+ISS+COVID-19+11_2021.pdf/3f0cd575-f744-9907-c8e4-5ab5f01d5c61?t=1622462865916, consultato il 10/08/2021

conseguente sostituzione degli infissi. Per quanto riguarda la parte impiantistica la caldaia a gasolio esistente è stata sostituita con una più efficiente a gas metano, i corpi scaldanti esistenti, i termosifoni, sono stati eliminati ed inseriti dei pannelli radianti a parete. Limitatamente alle aule per la didattica sono stati inseriti dei dispositivi di ventilazione meccanica controllata decentralizzati con recupero di calore, per migliorare la qualità dell'aria ma anche per ridurre le perdite energetiche dovute alla ventilazione naturale e al contempo ridurre notevolmente l'inquinamento acustico proveniente dall'esterno. I dispositivi, essendo indipendenti, sono controllabili in maniera autonoma dall'interno delle singole aule attraverso degli appositi sistemi di regolazione con la possibilità di metterlo in funzione solo quando i bambini sono presenti. Gli apparecchi sono stati appesi al soffitto per impedire che i bambini li raggiungano o che siano danneggiati da eventuali urti accidentali e successivamente nascosti all'interno di armadi contenitori. I dispositivi installati provvedono sia al miglioramento della qualità dell'aria, perché filtrata, sia al controllo dell'umidità eliminando il problema della formazione di condensa superficiale e quindi dell'eventuale proliferazione di muffe. Un ulteriore vantaggio relativo a queste macchine è il benessere acustico; infatti, la non apertura delle finestre per il ricambio dell'aria rende l'edificio acusticamente isolato dai rumori esterni e i dispositivi, essendo dotati di silenziatori, non compromettono le attività che vengono svolte all'interno delle aule. L'edificio che all'inizio aveva un consumo energetico pari a 165 kW/h/m² anno e ricadeva all'interno della classe energetica CasaClima G, è passato ad una CasaClima A con 18 kW/h/m² anno grazie a tutti gli interventi effettuati⁹⁸.

Scuola materna Santa Cecilia e nido integrato, Colfosco (TV)

L'edificio risale al 1952 ed è un istituto paritario gestito dalla comunità religiosa "Figlie della Madonna del Divino Amore". La struttura è composta da sette aule, una mensa, servizi igienici, un atrio e due uffici e conta in totale 82 alunni. Nel 2005 è stato installato all'interno della scuola un impianto di ventilazione meccanica controllata centralizzato, il vano tecnico che si trova sopra il tetto contiene la centrale termica di ventilazione.

⁹⁸ Boarin, P (2010), *Edilizia scolastica: riqualificazione energetica e ambientale: metodologie operative, requisiti, strategie ed esempi per gli interventi sul patrimonio esistente*, Edicom, Monfalcone, pp. 256-268

L'intervento prevede che i canali di mandata e ripresa non siano nascosti nel controsoffitto ma siano a vista e dotati di ugelli orientabili per immettere e riprendere l'aria come è possibile vedere in figura 29.

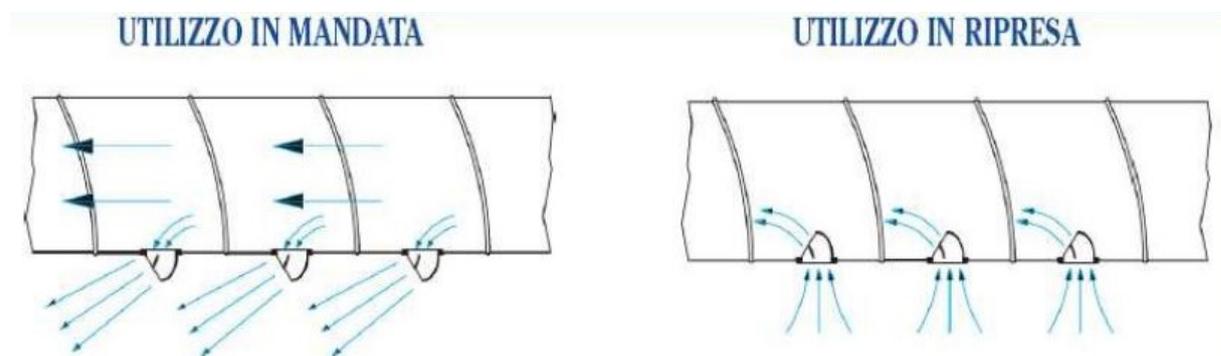


Figura 28: Funzionamento ugelli [fonte: vedi nota 99]

Per mitigare maggiormente l'impatto estetico delle canalizzazioni a vista sugli ambienti interni, sono stati usati dei canali verniciati a vista. L'aria viene immessa nelle aule e quella viziata viene prelevata dai servizi igienici e dal corridoio come è possibile osservare in figura 30. In particolare, i canali gialli sono quelli di ripresa mentre i rossi di mandata⁹⁹.



Figura 29: Canalizzazioni all'interno della scuola [fonte: vedi nota 99]

⁹⁹ L'intervento descritto è stato realizzato da Aldes Italia ed è disponibile al seguente link: http://portale.assimpredilance.it/uploads/allegati/4_Edificio_intelligente_ALDES_26mar13.pdf, consultato il 20/08/2021

Scuola primaria Karol Wojtyła, Cimbri (VA)

La scuola in questione sorge in una zona verdeggiante tra i comuni di Cimbri e Cuirone. L'edificio risale al 1982, ha una consistenza di 913 m² ed è formato da due corpi principali ed uno spazio comune per i servizi¹⁰⁰. L'intervento di riqualificazione energetica, avvenuto nel 2010 è stato reso necessario per correggere delle criticità rilevate nel sistema "edificio-impianto" e da situazioni di discomfort nell'utilizzo dei locali. In particolare, l'edificio presentava delle notevoli asimmetrie radianti e l'impianto di climatizzazione invernale a tutta aria provocava una differenza di temperatura elevata tra copertura e pavimentazione. La tipologia di climatizzazione presente necessitava di grossi volumi di aria surriscaldata, circa 15.000 m³/h di cui solo il 30% era aria nuova e conseguentemente i costi energetici erano notevoli sia per il trattamento dell'aria, sia per il consumo di gas metano e di energia elettrica per la movimentazione all'interno delle canalizzazioni. Con l'obiettivo di garantire il miglior comfort possibile, il minor consumo e correggere l'asimmetria radiante all'interno degli ambienti, gli interventi eseguiti sono stati:

- Lo smantellamento della UTA (Unità Trattamento dell'Aria), della centrale termica e dei sistemi di immissione nelle aule, conservando il canale principale per utilizzarlo come ripresa;
- Installazione di due gruppi di ventilazione con recupero di calore in parallelo da 2000 m³/h ciascuno. In caso di guasto di una unità, l'altro è in grado di garantire il corretto ricambio di aria;
- Pannelli radianti posizionati dall'interno sulla parete esterna, in grado di fornire circa 2/3 del fabbisogno di calore dell'ambiente;
- Integrazione del sistema di ventilazione con batterie idroniche con post recuperatore in modo da poter correggere la temperatura dell'aria immessa negli ambienti;
- Un circuito geotermico orizzontale per mitigare la temperatura dell'aria immessa nei sistemi di ventilazione. Il sistema recupera circa 7,5 kWh da una fonte rinnovabile, quindi senza nessun costo energetico aggiuntivo:

¹⁰⁰ I dati relativi alla consistenza dell'area, l'età dell'edificio sono disponibili sul sito "Edilizia in chiaro", gestito dal MIUR, in particolare la scuola a cui si fa riferimento ha il seguente codice meccanografico VAIC83400C e i dati sono leggibili al link <https://miurjb16.pubblica.istruzione.it/pes/dettaglio/edificio/0121380304/>, consultato il 20/08/2021

- Monitoraggio continuo elettronico dei parametri che regolano la qualità dell'aria indoor: CO₂, umidità relativa e temperatura;
- Nuova centrale termica a potenza ridotta a 45 kW con caldaia ad alto rendimento con accumulatore termico che può fornire calore all'edificio calore anche se il generatore si blocca.

L'impianto VMC è stato dimensionato considerando che gli occupanti sono circa 130 e riferendosi non alla UNI EN 13779 che prevede 7 m³/h a persona, ma alla normativa ASHRAE che invece ne prevede 27 m³/h; questa scelta è stata fatta per l'ottimale ossigenazione dell'ambiente. Considerando inoltre che i bambini sono soggetti delicati è stato installato un sensore in grado di rilevare la quantità di anidride carbonica e di modulare il ricambio di aria quando necessario¹⁰¹.

Scuola Karl Wolf, Merano (BZ)

L'edificio originario del 1975 si classificava come il più energivoro tra quelli del comune di Merano. La scuola ospita 365 scolari divisi in 20 classi ed è composto oltre che dalle aule per la didattica da un'aula Magna, da palestre e aule speciali al piano interrato. Il complesso è simmetrico e presenta quattro volumi che racchiudono un cortile interno. Nel 2019 si è concluso l'intervento di riqualificazione energetica della struttura che è passata da una classe energetica CasaClima E ad una A. Il progetto ha previsto l'isolamento termico delle facciate esterne, del tetto, la sostituzione delle finestre con nuovi serramenti a vetro triplo; è stato realizzato un tetto verde con possibilità di installazione di un impianto fotovoltaico. Per il miglioramento del microclima interno sono stati installati dei sistemi di ventilazione meccanica controllata decentralizzata con recupero di calore integrati nel foro finestra. L'insieme di tutte le azioni ha permesso di ridurre i costi in termini di consumi energetici notevolmente¹⁰².

¹⁰¹ Calone, E, a cura di, (2014), *Edilizia scolastica: riqualificazione, messa a norma, procedure*, Wolters Kluwer Italia, Milanofiori-Assago

¹⁰² I dati generici sono stati presi dal sito della scuola, disponibile al link <http://ssp-meranstadt.it/mittelschule-carl-wolf/>, consultato il 22/08/2021

L'intervento è stato descritto tramite due articoli, uno di Alpac (<https://alpac.it/2020/01/21/aria-piu-pulita-con-la-vmc-a-scuola/>) e l'altro del comune di Merano (https://www.comune.merano.bz.it/it/Scuola_Wolf_concluso_il_risanamento_energetico), consultato il 22/08/2021

Scuola primaria Lombardo Radice, Agrate Conturbia (NO)

L'istituto scolastico, costruito nel 1973, si trova ad Agrate Conturbia e fa parte dell'Istituto Comprensivo "Eugenio Montale". L'edificio ha un corpo longitudinale che occupa un'area di 655 m² ed ha un piano, sono presenti 5 classi e un totale di 57 alunni. L'intervento, che è stato eseguito nel 2021, riguarda essenzialmente l'installazione di sistemi di ventilazione meccanica decentralizzati con recupero di calore, in linea con l'attuale esigenza di riuscire a tenere aperta la scuola limitando il contagio da Corona Virus. È stato scelto un sistema decentralizzato, che necessita solo di due fori per l'entrata e l'uscita di aria, per evitare delle opere murarie invasive. La macchina può arrivare a portate di aria fino a 800 m³/h e può essere posizionata internamente all'ambiente su una parete perimetrale esterna¹⁰³. Di seguito si riportano tramite una tabella i dati più significativi delle scuole analizzate:

Nome	Anno di intervento	Consistenza area (m ²)	Conformazione della scuola	Numero piani	Numero alunni	Tipologia di impianto VMC
Materna di Monguelfo	2004	830	C	3 (uno interrato)	-	Decentralizzato, solo nelle aule didattiche
Materna Santa Cecilia	2005	-	-	1	82	Centralizzata con canali a vista
Primaria Karol Wojtyła	2010	913	Longitudinale	1	130	Centralizzata con circuito geotermico
Secondaria di I grado Karl Wolf	2019	-	A corte	3	365	Decentralizzata
Primaria Lombardo Radice	2021	655	Longitudinale	1	57	Decentralizzata

Tabella 28: Tabella riassuntiva degli interventi delle scuole studiate [fonte: mia elaborazione]

¹⁰³ L'età dell'edificio e la consistenza sono stati presi dal sito del MIUR "Edilizia in chiaro", l'edificio ha codice meccanografico NOIC820005 e i dati sono consultabili al link <https://miurjb16.pubblica.istruzione.it/pes/dettaglio/edificio/0030010002/>, consultato il 25/08/2021. L'intervento, realizzato da Helty è disponibile al link https://www.edilportale.com/news/2021/01/aziende/rientro-a-scuola-in-sicurezza-con-helty_80615_5.html, consultato il 25/08/2021.

Dalle varie scuole analizzate che hanno caratteristiche diverse tra loro, non è possibile tracciare delle linee guida di riferimento standardizzate in relazione a dei parametri fissi. Ovvero, non è possibile dedurre quale impianto sia il più efficace considerando una metratura o un numero di classi o studenti; ad esempio, per la scuola materna di Monguelfo e la Karol Wojtyła, che hanno una metratura confrontabile, sono stati scelti due impianti diversi. Da questo deriva che non vi è una metratura, né tantomeno un numero di alunni che rappresenta una soglia per l'installazione di un tipo di impianto piuttosto che un altro, ma il ragionamento andrà eseguito caso per caso. I fattori che possono concorrere alla scelta sono sicuramente di natura economica (considerando quanti ambienti devono essere ventilati), di natura temporale (la decentralizzata ha sicuramente un'installazione più veloce rispetto alla centralizzata) e infine dalle caratteristiche dall'edificio stesso (non tutte le strutture possono essere forate per il passaggio delle canalizzazioni). Uno dei grandi svantaggi della centralizzata è che non è possibile regolare la portata in base ai livelli di anidride carbonica ambiente per ambiente, ma rimane la stessa a prescindere. Quando non è possibile installare un impianto centralizzato, ad esempio se non vi è spazio sufficiente nell'edificio per ospitare una centrale di ventilazione, una valida alternativa è un impianto semi centralizzato. Questa tipologia permette di ventilare gruppi di aule con la stessa o simile funzione e tempo di occupazione e ha dimensioni più contenute dovendo garantire portate di minore entità rispetto ad una centralizzata per tutto l'edificio.

3. Il caso studio

3.1. Localizzazione e analisi ambientale

La scuola primaria “Il Gelso” fa parte della Direzione Didattica Quarto Circolo Cesena. L’edificio si trova a Ponte Pietra, una frazione di Cesena che si sviluppa lungo Via Cesenatico, la strada statale che collega Cesena con Cesenatico.

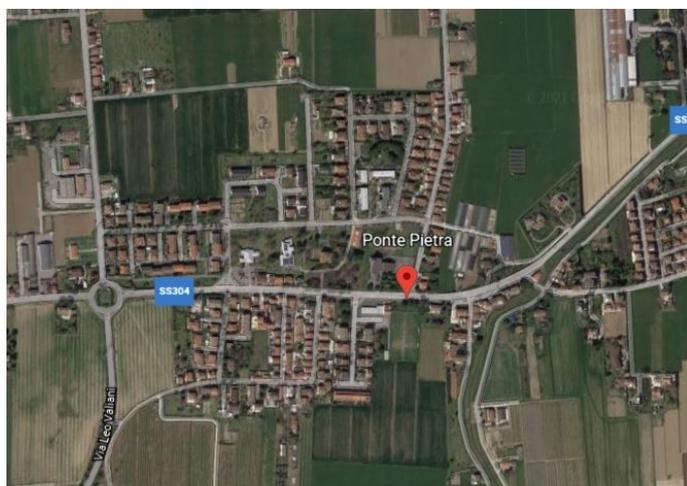


Figura 30: Inquadramento territoriale di Ponte Pietra [fonte: Google Earth]

Più precisamente l’edificio oggetto dell’intervento, evidenziato in figura 32 in rosso, si trova in un’area in cui sono anche presenti la scuola dell’infanzia “I Girasoli” facente parte della stessa Direzione Didattica, l’asilo nido “Piccole Stelle”, un parco denominato “Parco della Casa Rossa” e la parrocchia Santa Maria delle Grazie in Ponte Pietra. La restante parte della frazione risulta prevalentemente residenziale.

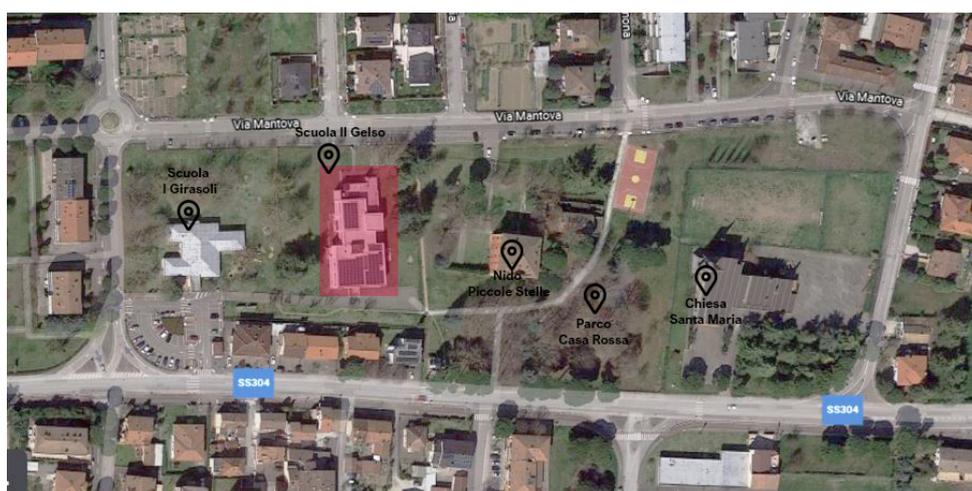


Figura 31: Area di intervento [fonte: rielaborazione da Google Earth]

In primis si conduce un’analisi climatica del sito in cui sorge la scuola oggetto di intervento; in particolare si studiano i parametri di temperatura, umidità dell’aria, venti, piogge e qualità dell’aria esterna.

La frazione di Ponte Pietra si trova nella zona climatica E caratterizzata da 2.130 gradi giorno, unità di misura che stima il fabbisogno energetico necessario per mantenere un clima confortevole nelle abitazioni, ad un valore alto di questo parametro corrisponde una maggiore necessità di tenere acceso l'impianto termico. La tabella mostra le temperature minima, massima e media di Cesena, l'umidità e le precipitazioni in mm con il numero di giorni di pioggia per mese¹⁰⁴.

	Gennaio	Febbraio	Marzo	Aprile	Maggio	Giugno	Luglio	Agosto	Settembre	Ottobre	Novembre	Dicembre
Medie Temperatura (°C)	4	4.9	8.7	12.5	17.1	21.8	24.4	23.8	18.9	14.6	9.7	5.2
Temperatura minima (°C)	0.4	0.5	-3.7	7.2	11.4	15.8	18.3	18	14	10.5	6.2	1.6
Temperatura massima (°C)	8.3	9.6	13.7	17.5	22	26.9	29.6	29.2	23.8	19.1	13.6	9.2
Precipitazioni (mm)	47	59	57	71	61	47	40	43	61	70	79	64
Umidità(%)	82%	78%	73%	71%	66%	61%	56%	60%	60%	78%	81%	83%
Giorni di pioggia (g.)	5	6	6	8	6	5	4	5	6	7	7	7
Ore di sole (ore)	5.1	6.3	8.3	9.8	11.7	12.8	12.8	11.7	9.6	6.6	5.5	5.1

Figura 32: Dati climatici di Cesena [fonte: vedi nota 104]

Per studiare quali sono i venti predominanti nella zona si fa riferimento alla rosa dei venti, che indica sia la direzione principale sia la velocità su media annua¹⁰⁵.

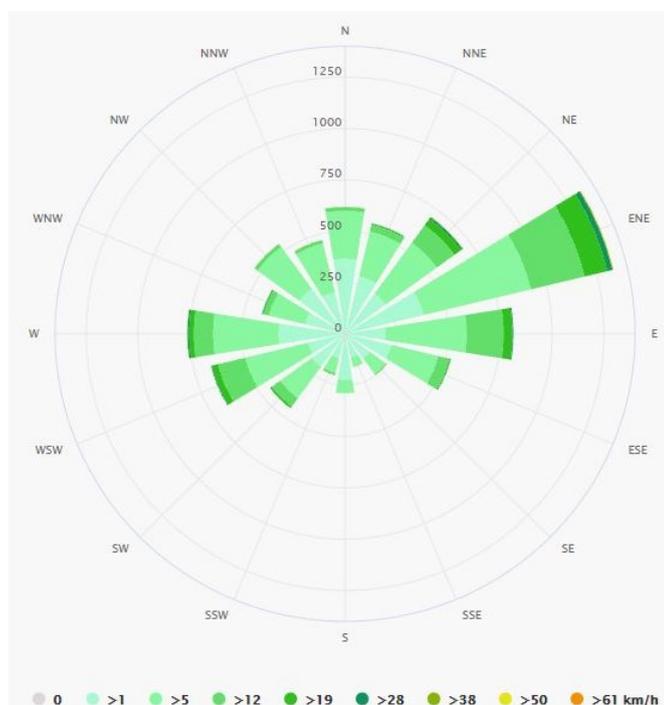


Figura 33: Rosa dei venti per Ponte Pietra [fonte: vedi nota 105]

¹⁰⁴ I dati sono stati presi da <https://it.climate-data.org/europa/italia/emilia-romagna/cesena-14286/#climate-graph>, consultato il 05/10/21

¹⁰⁵ La rosa dei venti è stata elaborata per la località Ponte Pietra da https://www.meteoblue.com/it/tempo/historyclimate/climatemodelled/ponte-pietra_italia_8958828, consultato il 05/10/21

Dalla rosa dei venti di Ponte Pietra si evidenzia che la direzione prevalente è nord-est e la velocità varia principalmente tra 1 km/h e 19 km/h raggiungendo rare volte i 28 km/h. Nel caso della scuola primaria il Gelso, la direzione predominante dei venti è quasi perpendicolare all'asse longitudinale dell'edificio, ne consegue che per la maggior parte delle volte il lato est sarà in sovrappressione mentre l'ovest in depressione. Non essendovi edifici alti nelle vicinanze o particolari ostruzioni la facciata est sarà esposta direttamente al vento.

Per quanto riguarda la qualità dell'aria esterna non sono presenti fonti di inquinamento come industrie pesanti e discariche; l'edificio, tuttavia, si trova nei pressi di una strada statale che può rappresentare una fonte di inquinamento a causa del traffico veicolare ma soprattutto un fattore di disagio acustico notevole. Per ottenere un quadro completo sulla qualità dell'aria nel contesto scelto, si analizzano in primis le rilevazioni per l'anno 2020 degli inquinanti nella provincia di Forlì-Cesena fornite dall'ARPAE¹⁰⁶. La stazione di riferimento presa è situata a Cesena, alla stazione Franchini Angeloni e monitora i livelli di particolato atmosferico e di biossido di azoto. In particolare, si riportano i valori del solo PM₁₀ il cui valore limite è stato fissato dall'Organizzazione Mondiale della Sanità nel 2005; entrambi i valori limite sono calcolati su media giornaliera¹⁰⁷.

Inquinante	Concentrazione limite giornaliera	Concentrazione limite annua
PM ₁₀	50 µg/m ³	20 µg/m ³

Tabella 29: Valori limite per PM10 [fonte: Organizzazione Mondiale della Sanità¹⁰⁸]

¹⁰⁶ L'ARPAE è l'Agenzia regionale per la prevenzione, l'ambiente e l'energia dell'Emilia-Romagna ed esercita attività di autorizzazione, concessione, monitoraggio dello stato ambientale, vigilanza e controllo e analisi analitiche e aggiunge, alle attività di tutela ambientale, quelle rivolte al campo dell'energia.

¹⁰⁷ I valori sono stati aggiornati nel 2021 con il "WHO global air quality guidelines" pubblicato a settembre e disponibile al sito <https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/345329/9789240034228-eng.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. I nuovi valori limite sono 45 µg/m³ per il limite giornaliero mentre per l'annuale 15 µg/m³, consultato il 05/10/21.

¹⁰⁸ WHO, (2005), *Air Quality Guidelines-Global Update*, disponibile all'indirizzo: https://www.euro.who.int/data/assets/pdf_file/0005/78638/E90038.pdf, consultato il 05/10/21

La normativa prevede al massimo 35 superamenti in un anno. I dati raccolti dalla stazione di Cesena per l'anno 2020 sono riportati nel grafico in figura 36¹⁰⁹.

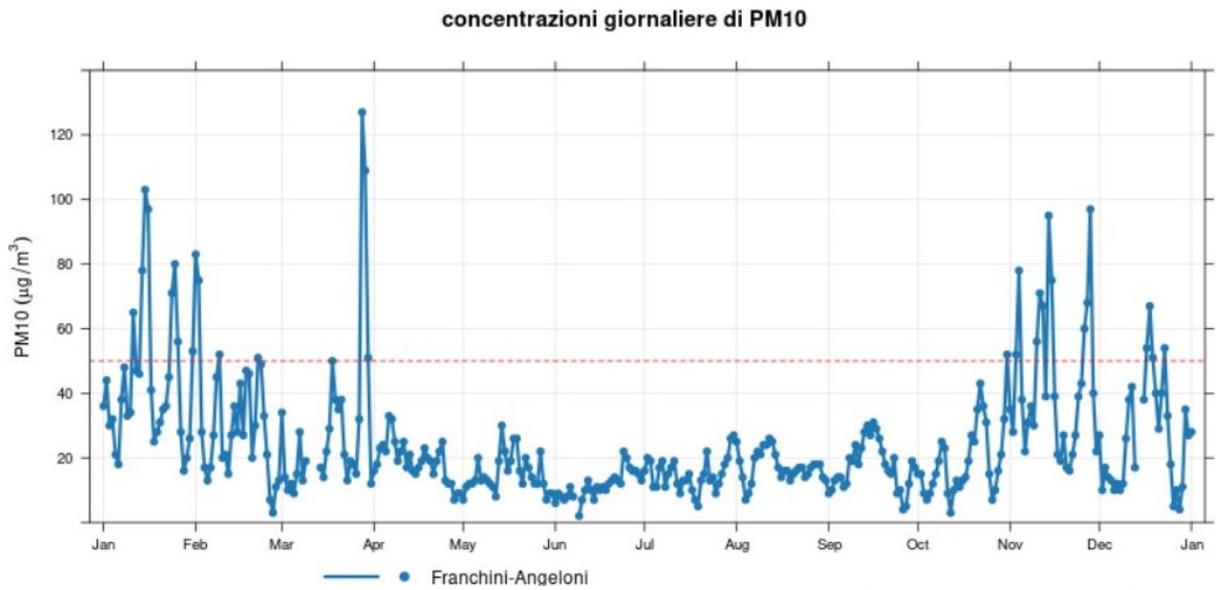


Figura 34: Andamento annuale delle concentrazioni di particolato atmosferico [fonte: vedi nota 109]

I periodi più critici sono tra gennaio e maggio e da ottobre a dicembre; tuttavia, a parte qualche picco in giornate particolari, non sono presenti dei livelli eccessivi.

Dall'andamento si ottengono i valori in tabella 30. Risulta a norma anche il limite relativo al superamento annuale che si attesta alle 30 volte.

Concentrazione minima	Concentrazione massima	Concentrazione media	Superamenti
<3 µg/m ³	127 µg/m ³	24 µg/m ³	30

Tabella 30: Concentrazioni rilevate dalla stazione Franchini Angeloni a Cesena [fonte: vedi nota 109]

¹⁰⁹ ARPAE, (2021), *Rete di monitoraggio della qualità dell'aria - Provincia di Forlì Cesena – Rapporto sulla qualità dell'aria anno 2020*, disponibile all'indirizzo: <https://www.arpae.it/it/il-territorio/forli-cesena/report-a-forli-cesena/aria/report-annuali-aria-a-forli-cesena/rapporto-qualita-dellaria-fc-anno-2020.pdf/view>, consultato il 05/10/21.

3.2. Stato di fatto

3.2.1. Caratteristiche generali dell'edificio scolastico

La scuola primaria il Gelso è situata in Piazzale Danilo Dolci 60 a Ponte Pietra ed è identificabile tramite le coordinate catastali di Foglio 114 e Particella 126 (dati aggiornati al 2021).



Figura 35: Scuola primaria Il Gelso [fonte: <https://dd4cesena.edu.it/pagina/80/il-gelso-ponte-pietra>]

L'ingresso principale in figura 36 si trova sul lato sud dell'edificio ed è presente un altro ingresso secondario sul lato nord. Dai dati SNAES¹¹⁰ si ricava che la superficie totale dell'area scolastica è di 4.947 mq mentre la superficie utile dell'edificio considerato solo il piano terra è di 940 mq. L'edificio risale al 1975 ed è stato realizzato tramite una tecnica costruttiva che all'epoca risultava moderna. La struttura portante è un telaio in acciaio rivestito in calcestruzzo come protezione al fuoco e le chiusure esterne verticali sono dei pannelli sandwich e blocchi di calcestruzzo alleggerito prefabbricati. Il tetto è piano e l'edificio è caratterizzato da ampie vetrate.

Lo scopo del presente elaborato è il miglioramento della qualità dell'aria nell'edificio scolastico in questione assicurando sia i corretti ricambi d'aria sia la salubrità della stessa. Per progettare al meglio l'impianto che soddisferà questi requisiti è necessario tenere conto di alcuni parametri:

- La conformazione dell'edificio;
- La funzione e la metratura dei vari ambienti;

¹¹⁰ Il Sistema Nazionale delle Anagrafi dell'Edilizia Scolastica (SNAES) è stato istituito per uniformare e standardizzare a livello nazionale le banche dati dell'Anagrafe dell'Edilizia Scolastica. In riferimento all'edificio oggetto di intervento è possibile trovare i dati SNAES al seguente indirizzo <https://miurjb16.pubblica.istruzione.it/pes/dettaglio/edificio/0400070176/>, consultato il 06/10/2021

- Il tasso di occupazione giornaliera degli spazi.

L'impianto dell'edificio è a blocco e si sviluppa su due piani fuori terra, internamente le aule sono disposte seguendo un'asse principale che si sviluppa nella direzione nord-sud. Attualmente la scuola è frequentata da 108 alunni divisi in 5 classi ed è presente quindi un solo ciclo. La scuola è dotata anche di 5 aule per attività speciali: laboratori di scienze e informatica, un'aula multimediale, un'aula di musica ed una biblioteca. Inoltre, al piano terra sono presenti una palestra che ha anche funzione di aula magna ed un locale mensa con annesso spazio per lo sporzionamento. Considerando l'emergenza sanitaria per COVID-2019, gli spazi momentaneamente vengono utilizzati per circa quattro ore e mezza al giorno.

Si esaminano in dettaglio gli spazi del primo e del secondo piano con le rispettive funzioni e metrature di ogni ambiente utilizzato.



Figura 36: Planimetrie con categorizzazione degli ambienti [fonte: mia elaborazione]

Al piano terra sono presenti tre aule per la didattica frontale, la biblioteca, il locale mensa con lo spazio per lo sporzionamento e la palestra; nei vani tecnici si trovano la centrale termica e l'unità di trattamento dell'aria. Al primo piano vi sono le restanti due aule per le lezioni frontali e quattro laboratori. In giallo sono rappresentati i servizi igienici. Gli ambienti che non sono contrassegnati da colori sono inutilizzati ma in precedenza avevano funzione di aule. L'orario prevede l'entrata dei bambini alle 8:15 e l'uscita alle 12:45 dal lunedì al sabato. Il servizio mensa attualmente è sospeso, mentre prima del COVID la scuola prevedeva rientri pomeridiani degli alunni fino alle 16:10. Infine, è importante tenere conto del numero variabile di classi e di alunni della scuola, con conseguente inutilizzazione di alcuni ambienti in determinati periodi. Ad esempio, nel 2012 gli alunni erano 123 divisi in 9 classi ed occupavano tutte le aule presenti nell'edificio.

3.2.2 Aspetti tecnici

La struttura portante del plesso scolastico è un telaio in acciaio rivestito in calcestruzzo come protezione al fuoco. Il passo della maglia strutturale è di 7,2 metri e corrisponde alla dimensione di un'aula come rappresentato in figura 39¹¹¹.

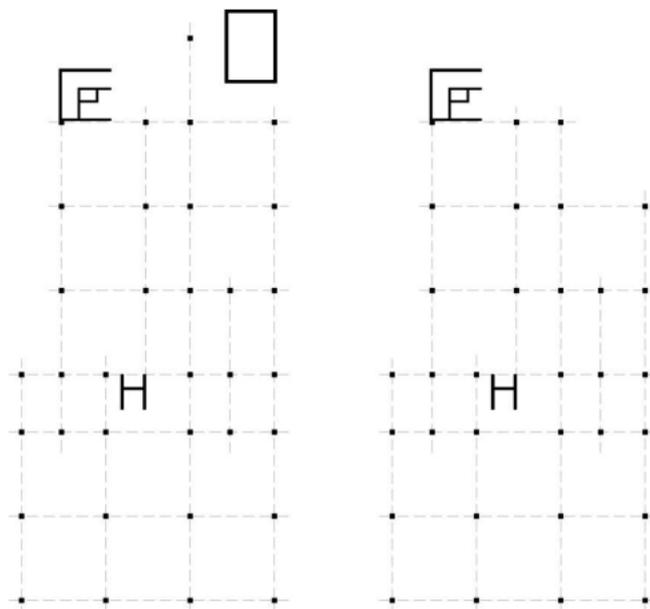


Figura 37: Maglia strutturale dell'edificio [fonte: vedi nota 111]

Solo i muri del vano ascensore, della scala antincendio e della centrale termica sono in calcestruzzo armato. Al fine di analizzare il comportamento energetico dell'edificio si studiano tutte le componenti disperdenti verso l'esterno che sono le chiusure verticali opache e trasparenti e le chiusure orizzontali. Si indicano sommariamente per ciascuna di queste categorie le stratigrafie e i valori di trasmittanza, questi ultimi ricavati immettendo nel software Termolog¹¹² le informazioni sui materiali e spessori, se conosciute. Il paragrafo si concentrerà maggiormente sul funzionamento del sistema di riscaldamento, produzione di acqua calda sanitaria e ventilazione, utile allo scopo dell'elaborato. Questi dati verranno poi inseriti nel software che calcolerà la classe di efficienza energetica dell'edificio.

¹¹¹ Le informazioni tecniche e parte delle figure sono state acquisite dalla tesi in Educazione Sostenibile – Progetto di riqualificazione del complesso scolastico Ponte Pietra a Cesena di Sara Campolucci e Marika Leandrini, A.A. 2011/2012

¹¹² Termolog 12 versione del 2021 della Logical Soft

Componenti opache verticali

I muri perimetrali esterni sono di tre tipologie:

- Tipologia 1: elementi prefabbricati in calcestruzzo alleggerito;
- Tipologia 2: calcestruzzo armato;
- Tipologia 3: pannelli sandwich.

Tipologia 1: Le chiusure verticali in blocchi di calcestruzzo presentano la seguente stratigrafia:

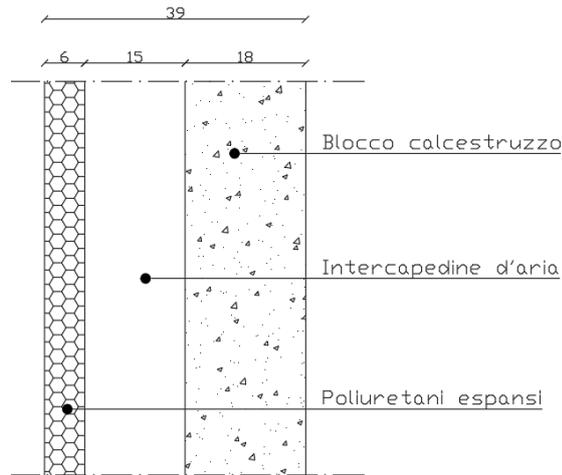


Figura 38: Stratigrafia parete tipologia 1 [fonte: mia rielaborazione da schermata di Termolog 12]

Caratteristiche tecniche:

INTERNO

	Strati	Spessore [mm]	R [m ² ·K/W]	λ [W/m·K]	ρ [kg/m ³]	C [kJ/kg·K]	μ × 10 ⁻⁵ [kg]
	Adduttanza interna (flusso orizzontale)		0.130	7.690		0.000	
A	Alluminio	1.5	0.000	220.000	2 700.000	0.230	0.000
B	Poliuretani espansi in situ	57.5	1.643	0.035	37.000	1.600	0.000
C	Alluminio	1.0	0.000	220.000	2 700.000	0.230	0.000
D	aria in quiete	150.0	5.769	0.026	1.300	1.000	0.000
E	Blocco pieno 245 x 500 massa volumica 800 (giunti malta 12 mm)	180.0	0.610	0.295	800.000	1.000	0.000
	Adduttanza esterna (flusso orizzontale)		0.040	25.000		0.000	

Figura 39: Stratigrafia in dettaglio della parete tipologia 1 [fonte: Termolog]

Da cui si ricava:

- Spessore totale 39 cm
- Trasmittanza termica $U=0,122 \text{ W/m}^2\text{K}$

Tipologia 2: calcestruzzo armato

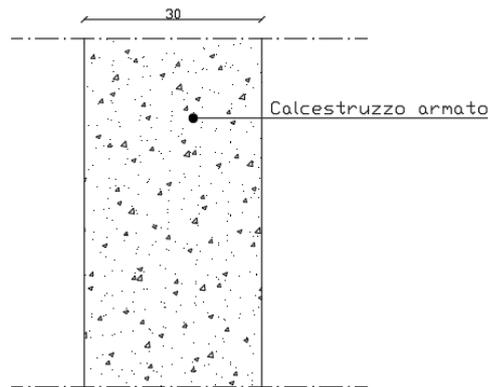


Figura 40: Stratigrafia parete tipologia 2 [fonte: mia rielaborazione da schermata di Termolog 12]

Caratteristiche tecniche:

INTERNO

	Strati	Spessore [mm]	R [m ² ·K/W]	λ [W/m·K]	ρ [kg/m ³]	C [kJ/kg·K]	μ × 10 ⁻⁵ [kg]
	Adduttanza interna (flusso orizzontale)		0,130	7,690		1,000	
A	Calcestruzzo (2200 kg a m3)	300,0	0,182	1,650	2.200,000	1,000	0,000
	Adduttanza esterna (flusso orizzontale)		0,040	25,000		1,000	

Figura 41: Stratigrafia in dettaglio della parete tipologia 2 [fonte: Termolog 12]

Da cui si ricava:

- Spessore totale 30 cm
- Trasmittanza U=2,842 W/m²K

Tipologia 3: Pannelli sandwich in poliuretano

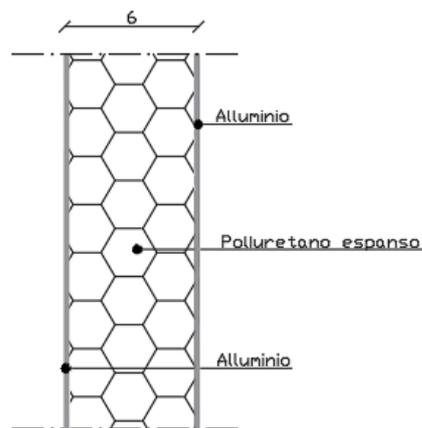


Figura 42: Stratigrafia parete tipologia 3 [fonte: mia elaborazione da schermata di Termolog 12]

Caratteristiche tecniche:

INTERNO

	Strati	Spessore [mm]	R [m ² ·K/W]	λ [W/m·K]	ρ [kg/m ³]	C [kJ/kg·K]	μ × 10 ⁻⁵ [kg]
	Adduttanza interna (flusso orizzontale)		0,130	7,690		0,000	
A	Alluminio	1,5	0,000	220,000	2 700,000	0,230	0,000
B	Poliuretani espansi in situ	57,5	1,643	0,035	37,000	1,600	0,000
C	Alluminio	1,0	0,000	220,000	2 700,000	0,230	0,000
	Adduttanza esterna (flusso orizzontale)		0,040	25,000		0,000	

Figura 43: Stratigrafia in dettaglio della parete tipologia 3 [fonte: Termolog 12]

Da cui si ricava:

- Spessore totale 6 cm
- Trasmittanza $U=0,552 \text{ W/m}^2\text{K}$

I pannelli sandwich sono assenti nel sottofinestra delle aule dove si trovano i terminali dell'impianto di riscaldamento, di conseguenza la struttura presenta molti ponti termici. Si confrontano i valori di trasmittanza delle pareti dell'edificio con i valori limite imposti dal decreto ministeriale del 26 giugno 2015 per la zona climatica E.

Tipologia di parete	U (W/m ² K)	U da normativa (W/m ² K) ¹¹³
Tipologia 1	0,122	0,26
Tipologia 2	2,842	0,26
Tipologia 3	0,552	0,26

Tabella 31: Confronto dei valori di trasmittanza con il DM 26 giugno 2015 [fonte: mia elaborazione]

Chiusure opache orizzontali

Le chiusure orizzontali che disperdono sono quelle confinanti con l'esterno, quindi essenzialmente due:

- Il solaio contro terra, in latero-cemento con massetto e pavimentazione, su vespaio aerato;
- Il solaio di copertura, in latero-cemento, con barriera al vapore, massetto per la pendenza in calcestruzzo, isolante, impermeabilizzante e uno strato di ghiaia.

Solaio contro terra: viene riportata la stratigrafia del solaio fino al vespaio aerato, all'interno del software viene specificato che il solaio è a contatto con il vespaio.

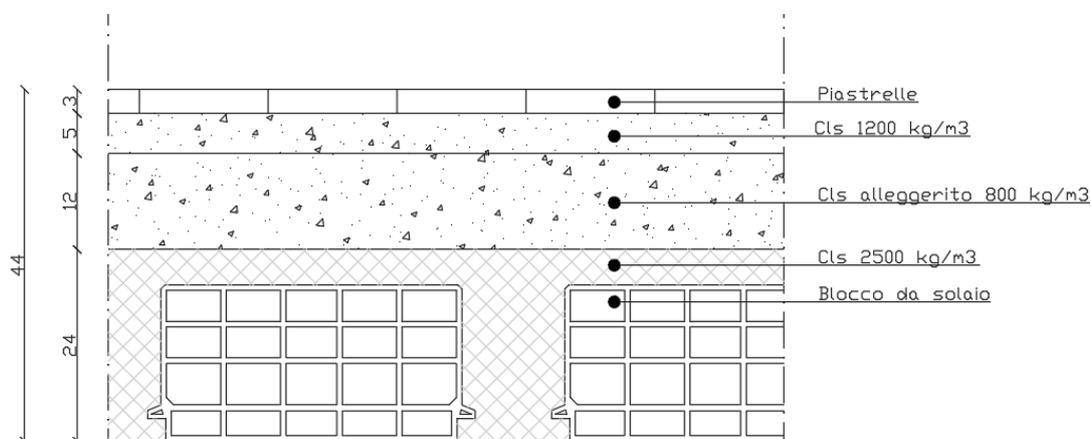


Figura 44: Stratigrafia del solaio confinante con un vespaio aerato [fonte: mia elaborazione da Termolog 12]

¹¹³ Decreto Ministeriale del 26 giugno 2015 - *Adeguamento linee guida nazionali per la certificazione energetica degli edifici*, Appendice A-tab.1

Caratteristiche tecniche:

INTERNO

	Strati	Spessore [mm]	R [m ² ·K/W]	λ [W/m·K]	ρ [kg/m ³]	C [kJ/kg·K]	μ × 10 ⁻⁵ [kg]
	Adduttanza interna (flusso verticale discendente)		0,170	5,880		1,000	
A	Piastrelle	30,0	0,030	1,000	2.300,000	0,840	0,000
B	Calcestruzzo (1200 kg/m ³)	50,0	0,106	0,470	1.200,000	0,880	0,000
C	Calcestruzzo (800 kg/m ³)	120,0	0,400	0,300	800,000	0,880	0,000
D	Solaio in laterocemento 20+4 con elementi di alleggerimento in opera	240,0	0,323	0,743	2.500,000	1,000	0,000

Figura 45: Stratigrafia in dettaglio del solaio a contatto con il vespaio aerato [fonte: Termolog 12]

Da cui si ricava:

- Spessore totale 44 cm
- Trasmittanza U=0,971 W/m²K

Solaio di copertura:

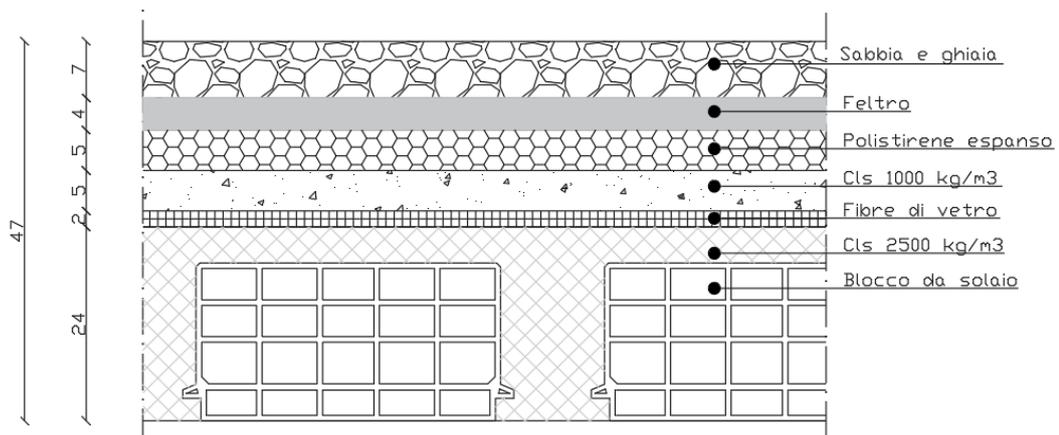


Figura 46: Stratigrafia della copertura [fonte: mia elaborazione da schermata di Termolog 12]

Caratteristiche tecniche:

INTERNO

	Strati	Spessore [mm]	R [m ² ·K/W]	λ [W/m·K]	ρ [kg/m ³]	C [kJ/kg·K]	μ × 10 ⁻⁵ [kg]
	Adduttanza interna (flusso verticale ascendente)		0,100	10,000		1,000	
A	Solaio in laterocemento 20+4 con elementi di alleggerimento in opera	240,0	0,323	0,743	2.500,000	1,000	0,000
B	Fibre di vetro pannelli rigidi	20,0	0,526	0,038	100,000	0,800	0,000
C	Calcestruzzo (1000 kg/m ³)	50,0	0,132	0,380	1.000,000	0,880	0,000
D	Polistirene espanso sinterizzato in lastre da blocchi, UNI 7891 (15 kg/...	50,0	1,111	0,045	15,000	1,340	0,000
E	Feltro o Foglio	40,0	0,174	0,230	1.100,000	1,000	0,000
F	Sabbia e ghiaia (1700 kg a m ³)	70,0	0,035	2,000	1.700,000	0,910	0,000
	Adduttanza esterna (flusso verticale ascendente)		0,040	25,000		1,000	

Figura 47: Stratigrafia in dettaglio della copertura [fonte: Termolog 12]

Da cui si ricava:

- Spessore totale 47 cm
- Valore della trasmittanza $U=0,410 \text{ W/m}^2\text{K}$

I valori vengono confrontati con i limiti imposti dal decreto ministeriale del 26 giugno 2015 per la zona climatica E:

Solaio	U ($\text{W/m}^2\text{K}$)	U da normativa ($\text{W/m}^2\text{K}$) ¹¹⁴
Contro terra	0,971	0,26
Copertura	0,410	0,22

Tabella 32: Confronto dei valori di trasmittanza con il DM 26 giugno 2015 [fonte: mia elaborazione]

Chiusure trasparenti

I serramenti hanno un profilo in alluminio a vetro singolo ed un valore di trasmittanza U_w pari a $4,093 \text{ W/m}^2\text{K}$, risultano quindi essere molto disperdenti e probabilmente non garantiscono un buon isolamento acustico.

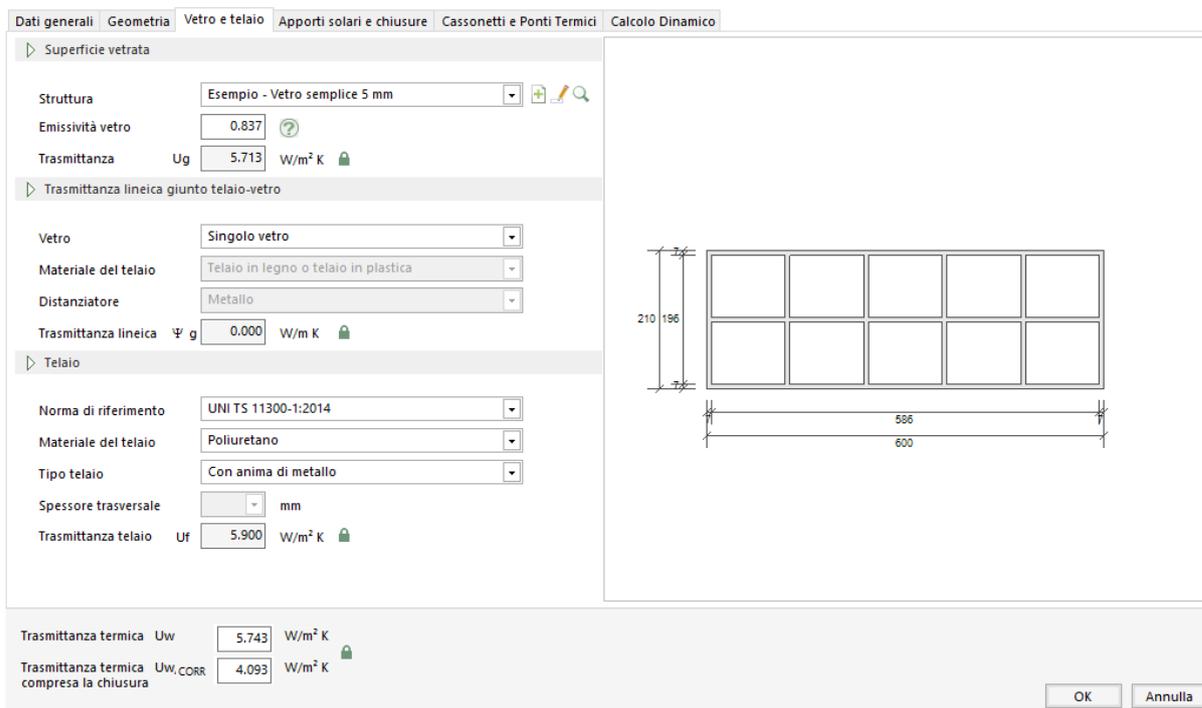


Figura 48: Caratteristiche dei serramenti [fonte: Termolog 12]

Per la zona climatica E il valore limite stabilito dal decreto ministeriale del 2015 è di $1,4 \text{ W/m}^2\text{K}$ ¹¹⁵.

¹¹⁴ Decreto Ministeriale del 26 giugno 2015 - *Adeguamento linee guida nazionali per la certificazione energetica degli edifici*, Appendice A-tab.2 e 3

¹¹⁵ Decreto Ministeriale del 26 giugno 2015 - *Adeguamento linee guida nazionali per la certificazione energetica degli edifici*, Appendice A-tab.4

Impianto di riscaldamento, produzione acqua calda sanitaria e ventilazione

La climatizzazione degli ambienti avviene mediante “mobiletti ad induzione”. Questi mobiletti disposti nel sottofinestra racchiudono una piastra radiante in acciaio con valvola di intercettazione, detentore, valvolina manuale di sfogo dell’aria e mensola di sostegno. La piastra è collegata all’impianto dell’acqua calda sanitaria alimentato da un generatore caldaia a condensazione “Ecoflam Ecomax KC 520” tramite due tubazioni, una per la mandata di acqua calda e una per il ritorno di quella fredda. Al di sotto della piastra radiante è posizionato il condotto in lamiera da cui fuoriesce l’aria attraverso degli ugelli. Questo flusso di aria filtrata sale per decompressione, si unisce a quello aspirato dall’ambiente e si riscalda entrando in contatto con la piastra per poi venire immesso nell’aula tramite una bocchetta posizionata nella parte alta del mobiletto. L’aria presente nei condotti è filtrata tramite una unità di trattamento dell’aria con sezione ventilante che si trova nella centrale termica, da cui parte la canalizzazione per la distribuzione nei vari ambienti. Il condotto è in lamiera con rivestimento termico ed è unico, si sviluppa orizzontalmente ed ha una sezione variabile, più larga vicino alla centrale e più stretta allontanandosi da questa. L’acqua calda sanitaria è prodotta da due generatori:

- Un bollitore elettrico con potenza utile nominale di 1,5 kW e rendimento al 75%;
- Un generatore ad energia elettrica con potenza utile nominale di 1,2 kW e rendimento al 100%.

Per condurre un’analisi energetica completa è necessario tenere conto del fatto che nel 2012 sono stati effettuati i seguenti interventi:

- È stata sostituita la caldaia, già cambiata nel 1989, con una nuova a condensazione;
- È stato installato un impianto fotovoltaico sulla copertura dell’edificio.

3.3 Calcolo della prestazione energetica dell'edificio

Il calcolo della prestazione energetica dell'edificio è stato eseguito tramite il software Termolog 12 della Logical Soft. L'obiettivo è di conoscere l'indice di prestazione energetica EP_{gl,nren}, cioè la quantità annua di energia primaria non rinnovabile necessaria per soddisfare i vari bisogni a uso standard dell'edificio. Questo indice tiene conto del fabbisogno di energia primaria non rinnovabile per la climatizzazione invernale ed estiva, per la produzione di acqua calda sanitaria, per la ventilazione e, nel caso del settore non residenziale, per l'illuminazione artificiale e per il trasporto di persone o cose¹¹⁶. Il Decreto ministeriale del 26 giugno 2015 introduce nel calcolo per la prestazione energetica il concetto di "edificio di riferimento", ossia un edificio identico a quello di progetto in termini di geometria, orientamento, ubicazione territoriale, destinazione d'uso, situazione al contorno e avente caratteristiche termiche e parametri energetici predeterminati. Dal confronto tra l'edificio di progetto e quello di riferimento si ottiene la classe di prestazione energetica della struttura¹¹⁷. Il software è stato validato dal CTI (Comitato Tecnico Italiano)¹¹⁸ ed esegue il calcolo basandosi sulle seguenti normative:

- UNI/TS 11300-1:2014 – Determinazione del fabbisogno di energia termica dell'edificio per la climatizzazione estiva ed invernale;
- UNI/TS 11300-2:2019 – Determinazione del fabbisogno di energia primaria e dei rendimenti per la climatizzazione invernale, per la produzione di acqua calda sanitaria, per la ventilazione e per l'illuminazione in edifici non residenziale;
- UNI/TS 11300-3:2010 – Determinazione del fabbisogno di energia primaria e dei rendimenti per la climatizzazione estiva;
- UNI/TS 11300-4:2012 – Utilizzo di energie rinnovabili e di altri metodi di generazione per la climatizzazione invernale e per la produzione di acqua calda sanitaria;
- UNI/TS 11300-5:2016 – Calcolo dell'energia primaria e della quota di energia da fonti rinnovabili;

¹¹⁶ Decreto Ministeriale del 26 giugno 2015 - *Adeguamento linee guida nazionali per la certificazione energetica degli edifici*, pag. 4

¹¹⁷ Decreto Ministeriale del 26 giugno 2015 - *Adeguamento linee guida nazionali per la certificazione energetica degli edifici*, Appendice A pag.2

¹¹⁸ Certificato n. 65 del 15/03/2017

- UNI/TS 11300-6:2016 – Determinazione del fabbisogno di energia per ascensori e scale mobili;
- Decreto Ministeriale del 26 giugno 2015 - Adeguamento linee guida nazionali per la certificazione energetica degli edifici.

Operativamente il calcolo si esegue in primis inserendo i dati generali dell'edificio, quindi l'ubicazione, il comune di appartenenza, la destinazione d'uso e i vari impianti presenti. Si divide poi l'edificio in più zone:

- La zona che comprende i locali riscaldati confinanti con quelli non riscaldati e l'esterno;
- La zona non riscaldata.

Nel caso della scuola primaria il Gelso si avrà un unico volume riscaldato delimitato dalle pareti perimetrali esterne, dalla copertura e dal solaio del piano terra. Il software propone due metodi per l'inserimento dei dati: il tabellare e l'analitico. È stato scelto il metodo tabellare che prevede la compilazione per via grafica dei vari dati. Si ricavano quindi le seguenti informazioni geometriche:

Volume lordo: 7.915,7 m³

Volume netto: 6.386 m³

Superficie utile: 1.678,22 m²

Superficie disperdente: 3.390,59 m²

Da cui si ottiene il rapporto S/V cioè il rapporto tra la superficie disperdente ed il volume climatizzato che risulta pari a:

$S/v=0,53 \text{ m}^{-1}$

Nella prima fase vengono definite le varie strutture che compongono l'involucro edilizio suddivise per tipologia: pareti, pavimenti, coperture, vetri, serramenti e ponti termici. Si inseriscono quindi le caratteristiche dei vari elementi elencate in precedenza all'interno del software.

Di seguito la tabella 33 riassume le caratteristiche delle varie componenti esposte nel paragrafo precedente.

Tipologia	Spessore (mm)	Trasmittanza (W/m ² K)
Muro Tipologia A (cls alleggerito)	390	0,122
Muro Tipologia B (cls armato)	300	2,842
Muro tipologia C (pannelli sandwich)	60	0,552
Copertura	470	0,410
Solaio su vespaio aerato	440	0,971
Serramenti	-	4,093

Tabella 33: Riepilogo strutture componenti l'involucro edilizio [fonte: mia elaborazione]

Le varie tipologie sono state poi associate alle pareti tramite metodo grafico direttamente su Termolog 12 ed è stato disegnato l'edificio in modo da avere un modello il più possibile prossimo alla realtà, riportato in figura 50.

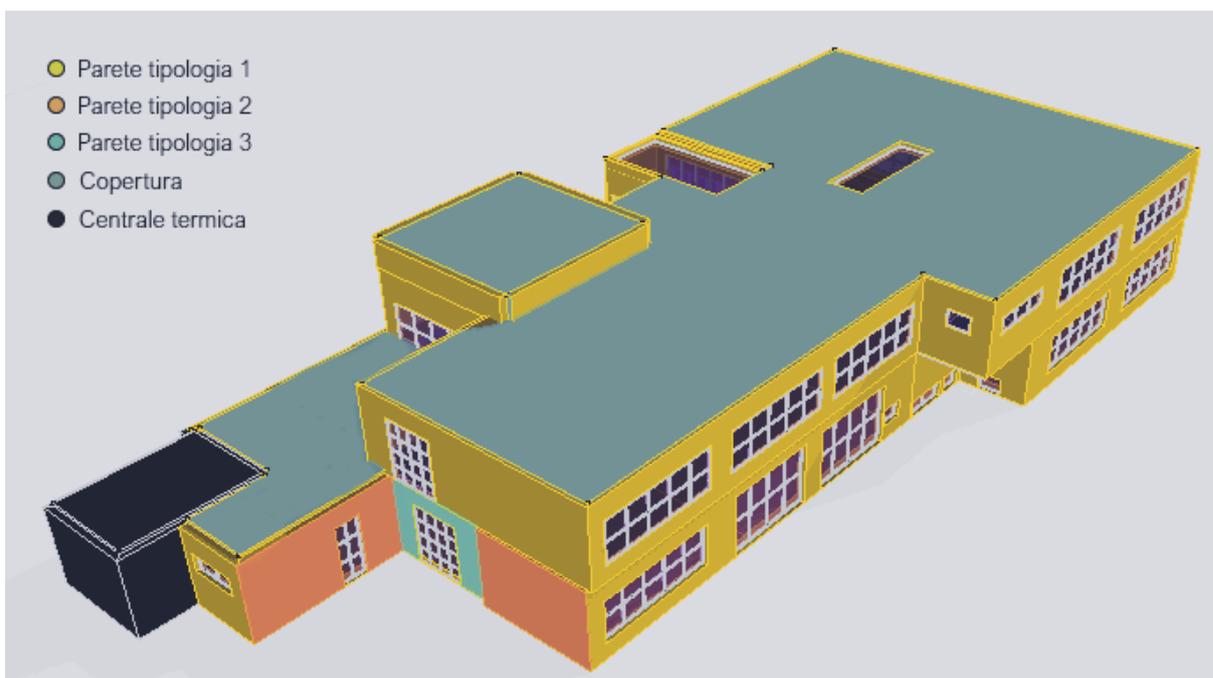


Figura 49: Modello 3D della scuola primaria Il Gelso [fonte: mia elaborazione da software Termolog 12]

Per quanto riguarda la parte impiantistica, il sistema di riscaldamento e ventilazione è separato da quello di produzione dell'acqua calda sanitaria. Per la modellazione dell'impianto di riscaldamento si è dovuto ricorrere ad una approssimazione il più vicina possibile alla realtà, non essendovi una definizione precisa per la tipologia di impianto presente nella scuola. Quindi nonostante il sistema di riscaldamento e ventilazione siano connessi tra loro, a scopo didattico nel software li consideriamo approssimati a due sistemi diversi:

- Il sistema di riscaldamento alimentato dalla caldaia “Ecoflam Ecomax KC 520” con terminali ventilconvettori;
- La UTA (Unità Trattamento dell’Aria) è stata approssimata ad un dispositivo di ventilazione meccanica centralizzato solo ad immissione senza recuperatore di calore.

Il sistema di riscaldamento, usato sempre dal 15 ottobre al 15 marzo, è composto da: generatore, rete di distribuzione e terminali di emissione. Per quanto riguarda il generatore vengono inserite le informazioni dell’ultima caldaia sostituita con anno di installazione 2012. Non è presente un accumulatore.

The screenshot displays the configuration interface for a heating generator. It is organized into three main sections:

- Caratteristiche generali:** Includes fields for 'Nome' (Generatore riscaldamento), 'Anno costruzione' (2012), 'Tipo' (Generatore di calore a gas a condensazione *****(4 stelle)), 'Modulante', 'Combustibile' (Metano), and 'Metodo di calcolo' (Rendimenti di generazione precalcolati (Paragrafo 6.6.2 UNI T)).
- Circuiti:** Shows 'Circuito accumulatore' with a 'Modifica' button.
- Potenze e rendimenti:** A table of power and efficiency data:

	max	min		
$\phi_{gn,Pn}$	549.00	164.70	kW	Potenza utile nominale
$W_{gn,Po}$	101.1		W	Potenza assorbita dalle pompe di circolazione
$W_{aux,Pn}$	929.4		W	Potenza degli ausiliari elettrici del generatore

Figura 50: Dati sul generatore per riscaldamento [fonte: Schermata Termolog 12]

I terminali di emissione nella realtà sono dei mobiletti ad induzione ma nel software sono stati approssimati a dei ventilconvettori.

The screenshot shows the configuration for terminal emissions. It includes the following sections:

- Terminali:** 'Terminale 1' is selected, 'Terminale 2' is 'non presente'.
- Prima tipologia di terminale:** 'Altezza locali fino a' is set to 4 m. 'Terminale di erogazione' is 'Ventilconvettori'.
- Ausiliari elettrici:** 'Portata d'aria ventilatore' is 'Fino a 200 m³/h', 'Funzionamento ventilatore' is 'Sempre in funzione', and 'Potenze ausili Waux,e' is 40.0 W.
- Terminali di emissione:**
 - 'Temperatura di mandata al terminale' ($\theta_{f,des}$) is 50.0 °C.
 - 'Temperatura di ritorno dal terminale' ($\theta_{r,des}$) is 45.0 °C.
 - 'Salto termico T' ($\Delta\theta_{des}$) is 27.5 °C.
 - 'Potenza termica di progetto emessa' ($\phi_{e,des}$) is 103580.8 W.
 - 'Terminali di emissione' is set to 'Parallelo'.

Figura 51: Dati sui terminali di emissione [fonte: Schermata Termolog 12]

L'unità di trattamento dell'aria assicura i ricambi della stessa negli ambienti ed è stata inserita come se fosse una ventilazione ibrida con sola immissione. I ricambi orari pari a 1,68 vol/h corrispondono alla portata calcolata in figura 53.

Locali	Tasso di ricambio (1/h)	Volume (mc)	Portata di aria per ambiente (mc/h)	Portata di aria per totale (mc/h)
Aula 1-4	1.68	178.2	299.376	1197.504
Biblioteca	1.68	92.4	155.232	155.232
Aula 5-7	1.68	165	277.2	831.6
Aula 8	1.68	115.5	194.04	194.04
Aula 9	1.68	128.7	216.216	216.216
Laboratori 1-2	1.68	122.1	205.128	410.256
Laboratori 3-4	1.68	138.6	232.848	465.696
Palestra	1.68	369.6	620.928	620.928
Refettorio	1.68	316.8	532.224	532.224
			TOTALE	4623.696

Figura 52: Portate di ricambio fornite dalla UTA [fonte: mia elaborazione]

Quindi inseriamo i dati relativi alla ventilazione dell'edificio. Non avendo un dato reale a disposizione la potenza elettrica dei ventilatori è stata inserita facendo riferimento alla scheda tecnica di una unità di trattamento dell'aria con caratteristiche simili a quella dell'edificio in questione¹¹⁹.

4 Ventilazione

Impostazioni avanzate

 H - C - V Ventilazione meccanica

E' presente un flusso d'aria prelevato da esterno Potenza el. ventilatori [W] 6000.00 

Tipo di funzionamento Ventilazione ibrida (meccanica e naturale)

Tipologia di diffusore Informazione non nota

Funzionamento ventilatori Solo ventilatore in immissione

Portata di immissione q_{ve,sup} 4623.7 m³/h Consiglia un valore  (max: 31 211.9 m³/h) 

Figura 53: Dati riguardanti il sistema di ventilazione [fonte: Schermata Termolog 12]

Per la produzione di acqua calda sanitaria sono stati inseriti due generatori:

- Un boiler elettrico ad accumulo (figura 54)

¹¹⁹ Si fa riferimento alla UTA 1 con portata massima di 8000 mc/h con due ventilatori da 2900 W, disponibile al link <https://www.utek-air.it/wp-content/uploads/2015/09/Scheda-tecnica-UTA.pdf>, consultato il 14/10/2021

- Un generatore effetto Joule (figura 54)

▷ Sistema di generazione 2 - Generatore a energia elettrica: sistema di produzione di acqua calda sanitaria

Nome Anno costruzione

Tipo

Combustibile

ϕ_n kW *Potenza utile nominale*

η_{gn} *Rendimento del sistema di generazione*

▷ Sistema di generazione 2 - Generatore a energia elettrica: sistema di produzione di acqua calda sanitaria

Nome Anno costruzione

Tipo

Combustibile

ϕ_n kW *Potenza utile nominale*

η_{gn} *Rendimento del sistema di generazione*

Figura 54: Generatori per la produzione di ACS [fonte: Schermata Termolog 12]

Infine, si riportano tra i generatori i pannelli fotovoltaici installati nel 2012.

Installazione di pannelli fotovoltaici

Nome

Pannello

n°	Area	Azimut	Inclinazione	
194	1,650	44,0	30,0	X

Calcola l'area minima necessaria per la copertura del 50 % dei fabbisogni

Impianto

Figura 55: Dati sull'impianto fotovoltaico [fonte: Schermata Termolog 12]

Si ottiene quindi l'indice di prestazione energetica dell'edificio in questione che risulta essere in classe energetica E, con un fabbisogno di energia pari a 155,53 kWh/m²annuo. In particolare, allo scopo del presente elaborato risultano utili i dati relativi al fabbisogno di energia termica e agli scambi termici per ventilazione. Se ne riportano quindi i valori elaborati tramite Termolog:

- Il fabbisogno di energia termica utile, definito come la quantità di calore che deve essere fornita ad un ambiente climatizzato per mantenere le condizioni di temperatura desiderate durante un dato periodo di tempo¹²⁰;

Fabbisogno di energia termica utile per (kWh/m ²)	
Riscaldamento (EPH,nd)	114,05
Raffrescamento (EPC,nd)	18,61
Acqua calda sanitaria (EPW,nd)	0,14
Ventilazione (EPV,nd)	31,32

Tabella 34: Fabbisogno di energia termica utile [fonte: Termolog 12]

- Gli scambi termici per stagione di riscaldamento e raffrescamento.

Stagione di riscaldamento	QH,tr (kWh)	QH,ve (kWh)	QH,ht (kWh)
	214.039,2	65.927,4	279.996,6
Stagione di raffrescamento	QC,tr (kWh)	QC,ve (kWh)	QC,ht (kWh)
	37.104,1	10.024,6	47.128,7

Tabella 35: Scambi termici nelle stagioni di riscaldamento e raffrescamento [fonte: Termolog 12]

Dove:

Q,tr è l'energia termica scambiata per trasmissione

Q,ve è l'energia termica scambiata per ventilazione

Q,ht è l'energia termica scambiata complessivamente

¹²⁰ UNI/TS 11300-1: 2014 – *Determinazione del fabbisogno di energia termica dell'edificio per la climatizzazione estiva ed invernale*

3.4. Analisi delle criticità allo stato di fatto

Lo studio condotto sull'edificio ha evidenziato alcune problematiche sia in termini di dispersione energetica dei componenti dell'involucro sia in termini di comfort interno degli occupanti. L'obiettivo principale della tesi è il miglioramento della qualità dell'aria negli ambienti scolastici che conseguentemente porta ad un potenziamento delle condizioni di comfort indoor. Quindi vengono analizzati nello specifico i possibili fattori di discomfort caratterizzanti il sistema di ventilazione della scuola primaria Il Gelso:

- I. L'aria immessa negli ambienti risulta carica di inquinanti;
- II. Notevole differenza di temperatura per gli occupanti che si trovano nelle vicinanze e nelle lontananze dei mobiletti ad induzione;
- III. Unica velocità di immissione delle portate di ricambio d'aria;
- IV. Il coefficiente di ricambio è pari a 1,68 vol/h;
- V. Necessità di sostituzione del filtro con uno conforme alle attuali normative;
- VI. Dal punto di vista energetico vi è notevole dispersione di calore derivante dall'assenza di un recuperatore di calore.

Descrivendo nello specifico il punto I, la causa dell'aria inquinata è da attribuire al funzionamento del mobiletto stesso al cui interno l'aria satura si rimescola con quella filtrata proveniente dal condotto aeraulico, come si può vedere in figura.

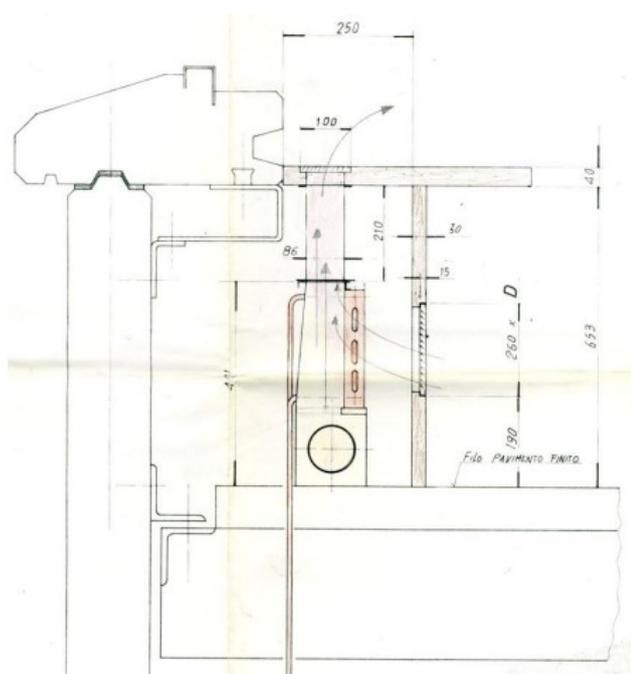


Figura 56: Funzionamento del mobiletto ad induzione [fonte: vedi nota 111]

Il punto II si focalizza sulla sensazione termica degli occupanti. Si ipotizza perciò l'andamento del flusso di aria all'interno degli ambienti tenendo conto del fatto che l'aria calda tende a salire perché più leggera e l'aria fredda a scendere. Quindi potendo approssimare il funzionamento dei mobiletti a quello dei ventilconvettori, l'aria calda uscente dal dispositivo salirà verso il soffitto mentre quella fredda si troverà nella parte bassa dell'ambiente, come rappresentato in figura. Questo può essere causa di sensazione di freddo per chi si trova lontano dal mobiletto mentre di molto caldo per chi invece è vicino.

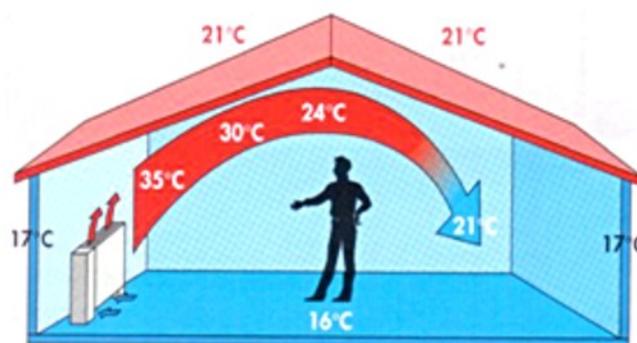


Figura 57: Andamento dei flussi di aria [fonte: <http://www.camisulweb.it/guida/riscaldamento-a-pavimento.html>]

Tuttavia, l'impianto esistente prevede che vi sia solo immissione di aria pulita (impianto monoflusso), per cui quando l'aria è carica di inquinanti per un corretto ricircolo sarà necessario aprire le finestre e fare arieggiare tramite ventilazione naturale. Questo comporta due svantaggi: la dispersione di calore dal punto di vista energetico e un possibile discomfort per quanto riguarda il benessere degli occupanti. Infatti, condurre un'analisi dettagliata e precisa dell'andamento dei flussi all'interno dei vari ambienti è complesso considerando che dipende da fattori climatici molto variabili. È comunque possibile studiare qualitativamente gli andamenti considerando alcuni fattori:

- La direzione prevalente dei venti;
- L'orientamento dell'edificio;
- La disposizione delle finestre nei vari ambienti.

Dall'analisi ambientale risulta che la direzione prevalente dei venti è nord est e lo scenario proposto fa riferimento a questa ipotesi. L'edificio si sviluppa lungo un'asse longitudinale in direzione nord-sud, per questo la facciata est è esposta direttamente al vento mentre la ovest si trova in depressione. Le aule sono in totale 14 di cui 10 sono caratterizzate da ampie superfici vetrate presenti solo su un lato dell'ambiente e le rimanenti 4 hanno finestre su più di un lato. Possiamo quindi ipotizzare qualitativamente i flussi di aria interni

a due aule, una con solo una apertura e una con tre aperture, considerando che il vento proviene dalla direzione nord-est.

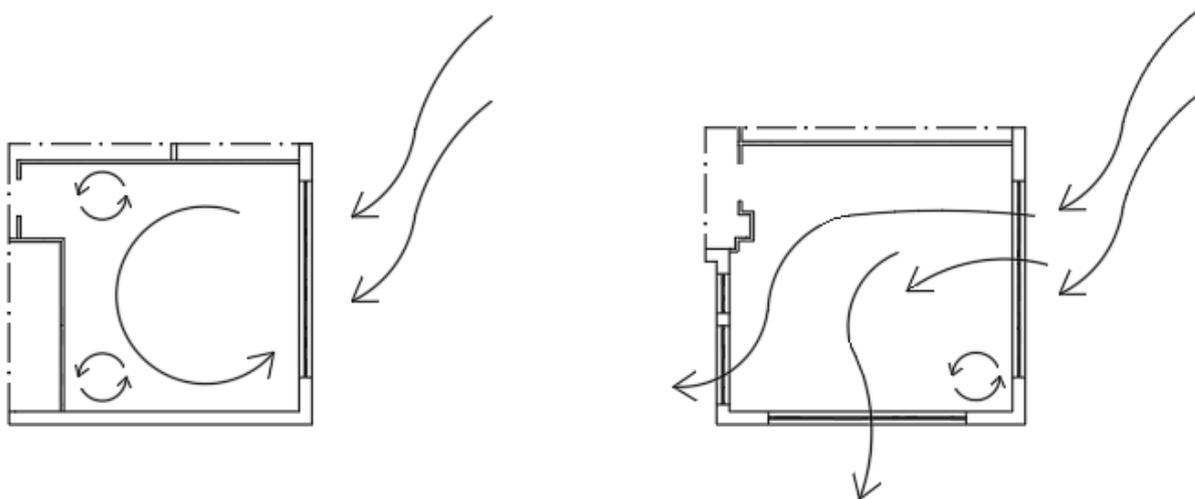


Figura 58: Flussi di aria in due aule della scuola Il Gelso [fonte: mia elaborazione]

3.5. Determinazione della portata di ricambio d'aria

Allo scopo di semplificare la lettura delle tabelle presenti nel seguente paragrafo, gli ambienti interni sono stati numerati come in figura.



Figura 59: Planimetrie con divisione interna dei locali [fonte: mia elaborazione]

Il calcolo delle portate di ricambio di aria viene eseguito applicando le disposizioni descritte nella UNI 10339¹²¹ in base alla destinazione d'uso dell'edificio. Si può procedere in quattro diversi modi a seconda dei parametri che si conoscono; il calcolo può essere eseguito in base al numero di occupanti, all'indice di affollamento, alla superficie o al volume del locale. Non conoscendo il numero esatto di alunni per aula e considerando che è un parametro variabile di anno in anno in un edificio scolastico, si procede tramite l'indice di affollamento. A livello applicativo i dati richiesti sono: la superficie dei locali, l'indice di affollamento e la portata di ricambio di aria per persona. Per ottenere la portata di aria totale è stato moltiplicato l'indice di affollamento per la superficie del locale e la portata di ricambio unitaria, poi convertito il risultato in m^3/h .

¹²¹ UNI 10339:1995 - *Impianti aeraulici al fine di benessere. Generalità, classificazione e requisiti. Regole per la richiesta d'offerta, l'offerta, l'ordine e la fornitura.*

Locali	Superficie (mq)	Volume (mc)	Indice di affollamento	Portata di ricambio unitaria (l/s pers)	Portata di aria totale (mc/h)	Tasso di ricambio (1/h)
Aula 1-4	54	178.2	0.45	5	437.4	2.5
Biblioteca	28	92.4	0.3	6	181.44	2.0
Aula 5-7	50	165	0.45	5	405	2.5
Aula 8	35	115.5	0.45	5	283.5	2.5
Aula 9	39	128.7	0.45	5	315.9	2.5
Laboratori 1-2	37	122.1	0.3	7	279.72	2.3
Laboratori 3-4	42	138.6	0.3	7	317.52	2.3

Figura 61: Calcolo delle portate di ricambio per ambiente [fonte: mia elaborazione]

Nella UNI 10339 non sono presenti limiti per quanto riguarda la mensa e la palestra ed è pertanto stato imposto come parametro dimensionante il tasso di ricambio del DM 18/12/1975 pari a 2,5 vol/h.

Locali	Tasso di ricambio (1/h)	Superficie (mq)	Volume (mc)	Portata di aria totale (mc/h)
Palestra	2.5	112	369.6	924
Refettorio	2.5	96	316.8	792

Figura 60: Calcolo delle portate di ricambio per mensa e palestra [fonte: mia elaborazione]

Per i servizi igienici è prevista solo l'estrazione dell'aria con un tasso di ricambio di 8 vol/h, nella tabella il valore rappresenta il totale della metratura dei bagni presenti nella scuola.

Locali	Tasso di ricambio (1/h)	Superficie (mq)	Volume (mc)	Portata di aria totale (mc/h)
Servizi igienici	8	45	148.5	1188

Figura 62: Portata di ricambio per i servizi igienici [fonte: mia elaborazione]

Queste portate assicurano un buon ricambio di aria secondo la UNI 10339, tuttavia possono risultare non ottimali per la diluizione dell'anidride carbonica, che viene garantita per portate più alte. Se quindi consideriamo dimensionanti i valori ottimali per la diluizione della CO₂, allora la portata per persona risulta superiore. Gli standards americani dettati dall'ASHRAE¹²² suggeriscono che utilizzando l'anidride carbonica come indicatore per il corretto ricambio dell'aria nelle scuole non si dovrebbero superare complessivamente le 1.000 ppm (figura 63).

¹²² ANSI/ASHRAE Standard 62.1-2001 – *Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality*



Figura 63: Livelli di CO2 e comfort definiti dall'ASHRAE

[fonte: https://www.deltaohm.com/News/marzo_2014/articolo_2.htm]

Per mantenere la concentrazione sotto le 1.000 ppm, considerando che quella esterna è di 413 ppm¹²³, è necessario dimensionare una portata di aria che garantisca la diluizione di meno di 580 ppm. Questa portata corrisponde alla categoria I descritta nella UNI 16798, che prevede un ricambio di 10 l/s per persona e una concentrazione di 550 ppm. Si calcolano quindi le nuove portate e tassi di ricambio per gli ambienti che vengono

Locali	Superficie (mq)	Volume (mc)	Indice di affollamento	Portata di ricambio unitaria (l/s pers)	Portata di aria totale (mc/h)	Tasso di ricambio (1/h)
Aula 1-4	54	178.2	0.45	10	874.8	4.9
Biblioteca	28	92.4	0.3	10	302.4	3.3
Aula 5-7	50	165	0.45	10	810	4.9
Aula 8	35	115.5	0.45	10	567	4.9
Aula 9	39	128.7	0.45	10	631.8	4.9
Laboratori 1-2	37	122.1	0.3	10	399.6	3.3
Laboratori 3-4	42	138.6	0.3	10	453.6	3.3

Figura 64: Portate di ricambio necessarie per la diluizione di CO2 [fonte: mia elaborazione]

frequentati maggiormente, cioè le aule per la didattica e le attività speciali.

È possibile notare che la differenza nei due calcoli è netta e per l'ottimale diluizione dell'anidride carbonica dovrebbero essere assicurate portate pari anche al doppio di quelle precedentemente calcolate con la UNI 10339.

¹²³ Il valore è stato preso dal sito del *Global Monitoring Laboratory* disponibile al seguente link <https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/>, consultato il 18/10/2021.

3.6. Ipotesi di due strategie di intervento

Dalle analisi condotte sull'edificio e dai punti critici evidenziati nel paragrafo precedente vengono ipotizzate due soluzioni che hanno come obiettivo principale il miglioramento della qualità all'interno degli ambienti scolastici in questione. Nell'ottica di velocizzare il rientro nelle scuole post pandemia, gli interventi sono mirati prioritariamente al solo impianto di ventilazione, lasciando, se possibile, invariato tutto il resto. Per ridurre le problematiche relative alla dispersione di energia, entrambe le ipotesi prevedono il recupero di calore. Per quanto riguarda la scelta del macchinario ci sono tre possibilità:

- La VMC centralizzata: serve interamente l'edificio ma prevede un volume di ingombro notevole date le elevate portate da garantire; quindi è necessario che l'edificio esistente abbia lo spazio per ospitare questa tipologia di macchinario e tutti i suoi componenti accessori;
- La VMC semi-centralizzata: in questo caso il dispositivo ventila gruppi di ambienti e presenta un ingombro minore rispetto alla centralizzata; tuttavia, è necessario che l'edificio abbia degli spazi per inserirla come ad esempio un controsoffitto;
- La VMC puntuale: ogni ambiente viene ventilato tramite un dispositivo che può essere nascosto oppure tenuto a vista.

Relativamente alla scuola il Gelso per la progettazione e la scelta del macchinario sono stati considerati i seguenti parametri:

- Le aule attualmente occupate;
- La permanenza in ore all'interno degli ambienti;
- La disposizione interna degli spazi;
- La conformazione dell'impianto al suo stato di fatto.

La scuola è soggetta ad una variabilità nel numero degli alunni e delle classi; nel 2011 gli alunni erano 121 divisi in 9 classi, mentre oggi ve ne sono 108 in 5 classi. Da questo deriva che i restanti 4 ambienti, che avevano la funzione di aule per la didattica, sono momentaneamente inutilizzati. Inoltre, i principali luoghi per la didattica sono le aule quindi i laboratori saranno occupati non continuativamente. Prevedere un impianto semi-centralizzato risulterebbe efficiente se fosse possibile ventilare degli ambienti con la stessa funzione, una metratura simile e lo stesso grado di occupazione. Nell'edificio in questione si potrebbero ipotizzare più unità ventilanti per piano, una al servizio delle aule e una per le attività speciali. Se però si esamina la disposizione interna degli ambienti soprattutto al

primo piano, si nota che risulta disomogenea; non vi è infatti un raggruppamento di aule con la stessa funzione. Quindi essenzialmente questa opzione non è stata considerata vantaggiosa perché presenta le stesse caratteristiche di un impianto centralizzato ma con costi sicuramente superiori. Alla luce di queste considerazioni sono state elaborate due strategie:

- **STRATEGIA 1:** prevede una ventilazione centralizzata non avendo problemi di spazio legati all'ingombro del macchinario;
- **STRATEGIA 2:** un sistema decentralizzato di ventilazione e necessariamente un nuovo impianto di riscaldamento.

3.6.1. Analisi della strategia 1

La prima strategia si basa sullo sfruttamento del sistema di riscaldamento e ventilazione già presente nella struttura. Per questo prevede essenzialmente questi interventi:

- Lo smantellamento della unità trattamento dell'aria;
- L'installazione di un dispositivo di ventilazione meccanica controllata centralizzato;
- L'installazione di sensori di CO₂ all'interno degli ambienti.

Il nuovo dispositivo sarà collocato all'interno della centrale termica comunicante con l'esterno. Dovendo assicurare portate notevoli il macchinario risulterà di grandi dimensioni. Per il calcolo della portata totale si fa riferimento alla tabella in figura, usando le disposizioni dettate dalla UNI 10339 si ottiene una portata di ricambio pari alla somma delle portate determinate per i singoli ambienti.

Locali	Portata di aria per ambiente (mc/h)	Portata di aria totale (mc/h)
Aula 1-4	437.4	1749.6
Biblioteca	181.44	181.44
Aula 5-7	405	1215
Aula 8	283.5	283.5
Aula 9	315.9	315.9
Laboratori 1-2	279.72	559.44
Laboratori 3-4	317.52	635.04
Palestra	924	924
Refettorio	792	792
TOTALE		6655.92

Figura 65: Portata totale di ricambio [fonte: mia elaborazione]

In tabella il totale rappresenta la portata di aria in mandata, per l'estrazione è necessario sommare la portata dei servizi igienici pari a 1.188 m³/h. Quindi ricapitolando:

- La portata di mandata è pari a 6.655,9 m³/h
- La portata di estrazione è pari a 7.843,9 m³/h.

È necessario quindi un dispositivo che assicuri una portata di ricambio pari almeno alla portata di estrazione. Inoltre, poiché i servizi igienici prevedono solo l'estrazione dell'aria sbilanciando i due flussi, bisogna integrare il sistema con un regolatore di portata affinché sia garantita l'efficienza del dispositivo. Per portate di questo calibro le possibilità sono limitate ed il macchinario che è stato preso in considerazione è la centrale di trattamento d'aria "VEX700T" di Aldes che prevede 8 modelli per portate fino a 10.000 m³/h. In

particolare, è stata scelta la “VEX780T”¹²⁴ che prevede una portata di 8.000 m³/h con dimensioni e peso descritte nella figura.

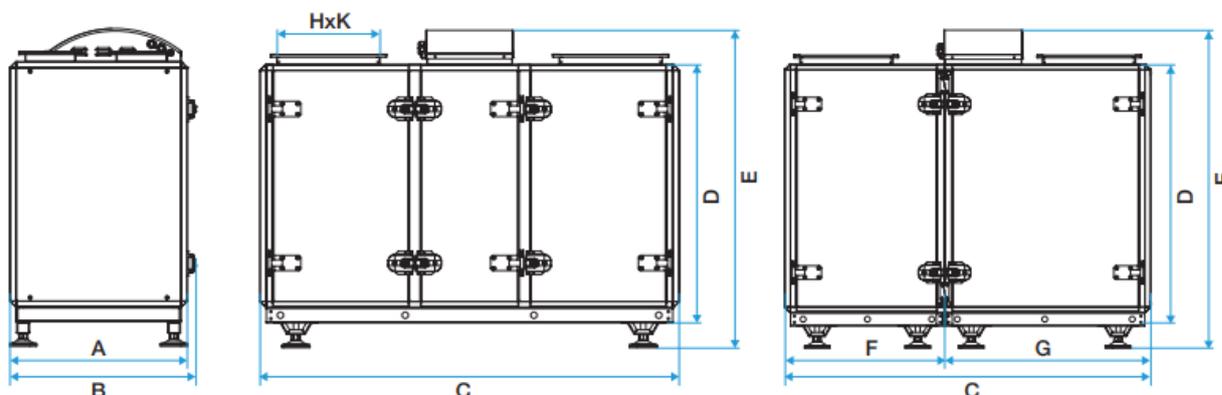


Figura 66: Dimensioni della centrale di ventilazione VEXT80T [fonte: vedi nota 124]

Dimensioni:

Modello	A (mm)	B (mm)	C (mm)	D (mm)	E (mm)	F (mm)	G (mm)	H*K (mm)	Φ (mm)	Peso (kg)
VEX780T	1405	1460	1903	1405	1680	860	1070	550*500	560	485

Tabella 36: Dimensioni della VEX 780T [fonte: vedi nota 124]

L’attacco delle canalizzazioni può essere sia rettangolare che circolare. La centrale termica di cui dispone l’edificio ha dimensioni pari a 4x2,7 m, consentendo il posizionamento del macchinario.

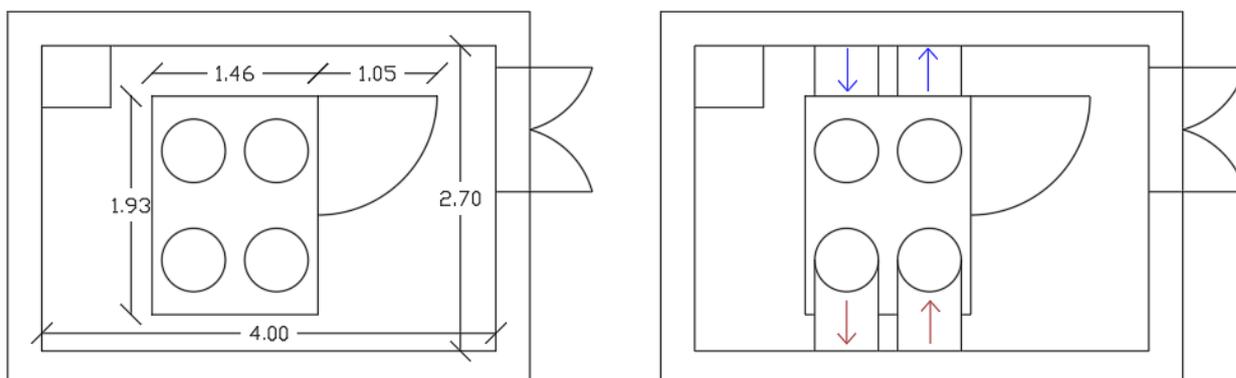


Figura 67: Ingombro dell’unità di ventilazione [fonte: mia elaborazione]

Il dispositivo presenta le seguenti caratteristiche:

- Scambiatore di calore ad alta efficienza, fino all’86 %;
- Funzionamento a velocità, portata e pressione costante;

¹²⁴Scheda tecnica disponibile al link <https://www.aldes.it/img/2019/12/VEX700-catalogo.pdf>, consultato il 17/10/21

- Filtri “M5” per l’aria in estrazione e su quella di rinnovo “F7” di base con possibilità di mettere la “F9”;
- Orologio integrato: gestione della regolazione in fasce orarie.

La sostituzione dell’unità di trattamento dell’aria con il dispositivo centralizzato permette di sfruttare sia il sistema di riscaldamento esistente sia i fori già presenti per consentire il passaggio delle canalizzazioni della UTA (Unità Trattamento dell’Aria). Quindi dalla centrale termica partono due canali con diametro 500 mm di tipo “ALFLEX ALU”¹²⁵ che raggiungono l’ingresso della scuola. Questi canali si dirigono in due plenum, uno per la mandata ed uno per l’estrusione e ogni plenum permette la divisione in due canali con diametro minore pari a 406 mm di tipo “ALGAINE ALU INSO”, in modo che la velocità all’interno sia massimo di 8 m/s. La velocità è stata calcolata tramite la seguente relazione¹²⁶:

$$v = 278 * \frac{4 * G}{\pi * D^2}$$

Dove:

G è la portata in m³/h

D il diametro del canale in mm

Quindi applicando questa relazione si verifica che i canali abbiano un diametro adeguato alla velocità da rispettare.

Zona	Portata di aria per ambiente (mc/h)	Diametro del canale Φ (mm)	Velocità (m/s)
PIANO T	3647.04	400	8.1
PIANO 1	3008.88	400	6.7

Figura 68: Calcolo delle velocità nei condotti di transito [fonte: mia elaborazione]

Un canale è destinato al piano terra ed uno a quello superiore e rappresentano i canali di transito da cui poi si diramano i canali che ventilano le aule di diametro 203 mm di tipo “ALGAINE ALU INSO”. All’interno degli spazi per la didattica la velocità dell’aria nei canali deve essere compresa tra i 2 m/s e i 4 m/s. Applicando nuovamente l’equazione che lega il diametro con la portata e la velocità, si ottengono i risultati in tabella. Per la palestra

¹²⁵ Scheda tecnica delle canalizzazioni disponibile al link https://www.aldes.it/img/2016/10/Algaine-Alflex_scheda-tecnica.pdf, consultato il 20/10/21

¹²⁶ Doninelli, M & Doninelli, M (2006), *Tabelle e diagrammi perdite di carico aria*, Quaderni Caleffi, disponibile al link <https://www.caleffi.com/sites/default/files/file/aria.pdf>, consultato il 26/10/21

sono stati considerati due canali da 203 mm per la posizione dei mobiletti ad induzione su due lati diversi dell'ambiente come si può vedere in figura.

Locali	Portata di aria per ambiente (mc/h)	Diametro del canale Φ (mm)	Velocità (m/s)
Aula 1-4	437.4	200	3.9
Biblioteca	181.44	200	1.6
Aula 5-7	405	200	3.6
Aula 8	283.5	200	2.5
Aula 9	315.9	200	2.8
Laboratori 1-2	279.72	200	2.5
Laboratori 3-4	317.52	200	2.8
Palestra	462	200	4.1
Refettorio	792	300	3.1

Figura 69: Calcolo delle velocità nei condotti secondari [fonte: mia elaborazione]

Per la mensa i canali presentano un diametro maggiore affinché non sia superata la velocità massima di 4 m/s. Le canalizzazioni scelte sono inoltre insonorizzate per garantire il minore impatto acustico. Per quanto riguarda i terminali di mandata vengono sfruttati i mobiletti ad induzione già presenti che si trovano nel sotto finestra, mentre le bocchette di estrazione saranno posizionate in alto nel lato opposto a quelle di mandata. Le canalizzazioni saranno nascoste nel controsoffitto già presente nell'edificio. Le bocchette di ripresa sono dei diffusori circolari regolabili con diametro 160 mm¹²⁷ che assicurano una portata compresa tra i 110 m³/h e i 280 m³/h e il loro numero varia in funzione della portata di ogni ambiente. Dividendo la portata di aria per ambiente per quella minima della bocchetta si ottiene il numero di bocchette per locale illustrato in tabella.

Locali	Portata di aria per ambiente (mc/h)	Numero di bocchette
Aula 1-4	437.4	4
Biblioteca	181.44	2
Aula 5-7	405	4
Aula 8	283.5	3
Aula 9	315.9	3
Laboratori 1-2	279.72	3
Laboratori 3-4	317.52	3
Palestra	924	6
Refettorio	792	7
Servizi igienici	1188	11

Figura 70: Numero bocchette di ripresa per ambiente [fonte: mia elaborazione]

¹²⁷ Scheda tecnica dei diffusori disponibile al link <https://www.aldes.it/img/2016/10/Diffusori-a-coni-fissi.pdf>, consultato il 17/10/21

È possibile delineare qualitativamente l'andamento dell'impianto nella scuola come nelle figure 72 e 73. In blu l'aria pulita entrante nell'edificio e in rosso l'aria saturo di inquinanti.

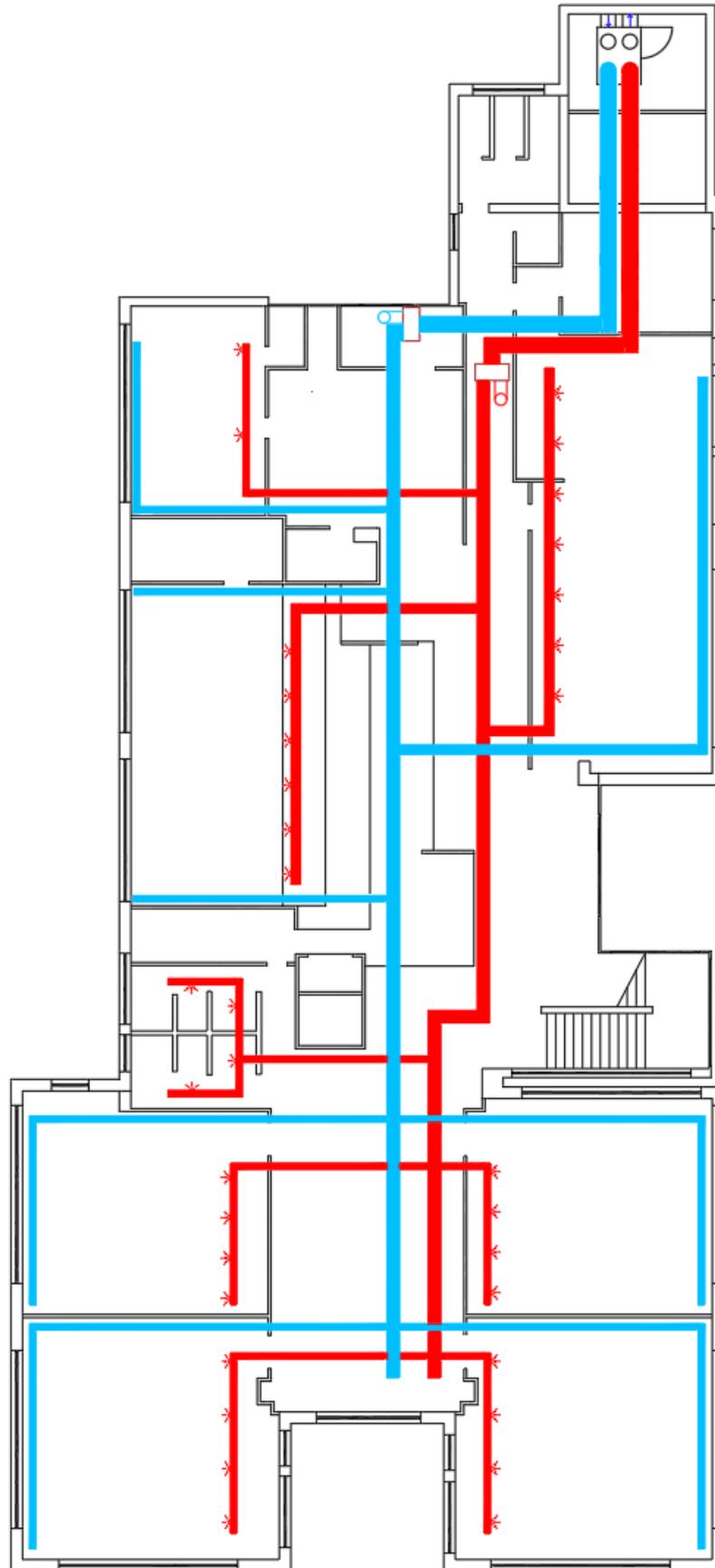


Figura 71: Distribuzione dei canali della VMC centralizzata al piano terra [fonte: mia elaborazione]

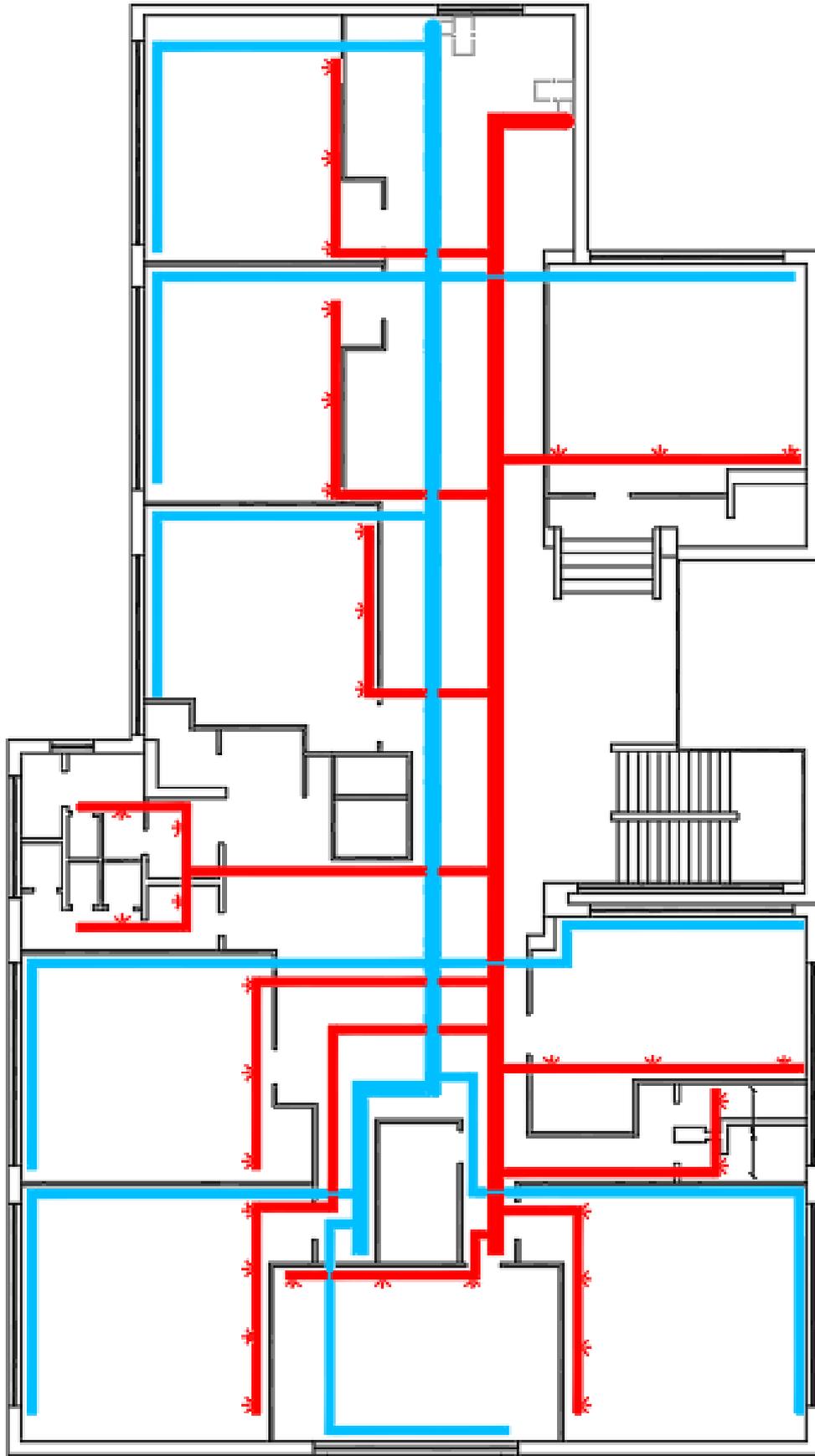


Figura 72: Distribuzione dei canali della VMC centralizzata al primo piano [fonte: mia elaborazione]

Lasciando tutto invariato ed andando ad inserire all'interno di Termolog i nuovi dati relativi all'impianto e calcolando di nuovo l'indice di prestazione dell'edificio otteniamo i nuovi valori dei fabbisogni di energia termica e ventilazione. La potenza elettrica dei ventilatori è la somma delle potenze del ventilatore di immissione e di estrazione, per cui sono stati scelti due ventilatori interni alle canalizzazioni che sono in grado di distribuire le portate richieste. Quindi selezionando un ventilatore con capacità pari a 6.500 m³/h in mandata e 7.600 m³/h in ripresa, con rispettive potenze 0,25 kW e 0,37 kW, si ottiene una potenza totale pari a 0,62 kW¹²⁸.

Ventilazione

Impostazioni avanzate

H - C - V Ventilazione meccanica

E' presente un flusso d'aria prelevato da esterno Potenza el. ventilatori [W] 620.00

Tipo di funzionamento Ventilazione meccanica controllata

Tipologia di diffusore Informazione non nota

Funzionamento ventilatori Ventilatori in immissione ed estrazione (doppio flusso) con recupero di ca

Portata di immissione $q_{ve,sup}$ 6655.0 m³/h Consiglia un valore (max: 31 211.9 m³/h)

Portata di estrazione $q_{ve,ext}$ 7843.0 m³/h Consiglia un valore (max: 31 211.9 m³/h)

Rendimento del recuperatore $\eta_{nru,eff}$ H 0.86 C 0.86 V 0.86 (valore tra zero e uno)

Figura 73: Distribuzione dei canali della VMC centralizzata al primo piano [fonte: mia elaborazione]

Lasciando invariato tutto il resto dell'edificio e apportando come unica modifica quella di una ventilazione interamente meccanica con recupero di calore si ricalcola l'indice di prestazione energetica dell'edificio. Il nuovo fabbisogno di energia primaria risulta di 97,77 kWh/m²annuo e si confrontano i dati dello stato di fatto con quelli della strategia 1.

Fabbisogno di energia utile per (kWh/m ²)	Stato di fatto	Strategia 1
Riscaldamento (EPH,nd)	114,05	78,99
Raffrescamento (EPC,nd)	18,61	23,4
Acqua calda sanitaria (EPW,nd)	0,14	0,14
Ventilazione (EPV,nd)	31,32	3,24

Tabella 37: Fabbisogno di energia utile allo stato di fatto e della strategia 1

[fonte: mia elaborazione da dati Termolog 12]

¹²⁸ Le informazioni sui ventilatori sono state prese da <https://www.ecoclima.com/catalogo-generale/ventilatori~323/elicoidali~1295/evei-ventilatori-assiali-intubati-motore-unel-mec~1372.html>, consultato il 17/10/21

Mentre per gli scambi termici:

Stagione di riscaldamento		QH,tr (kWh)	QH,ve (kWh)	QH,ht (kWh)
	Sdf	214.039,2	65.927,4	279.996,6
S1	205.370,9	14.161,1	219.532	
Stagione di raffrescamento		QC,tr (kWh)	QC,ve (kWh)	QC,ht (kWh)
	Sdf	37.104,1	10.024,6	47.128,7
S1	56.550,8	3.546,2	60.097	

Tabella 38: Scambi termici per trasmissione e per ventilazione [fonte: mia elaborazione da dati Termolog 12]

Si può notare dai nuovi dati che gli scambi termici per ventilazione sono diminuiti del 79% nella stagione di riscaldamento e del 65% durante quella di raffrescamento. Il fabbisogno di energia utile per riscaldamento presenta una diminuzione di circa il 31% grazie al recuperatore di calore della ventilazione meccanica e il fabbisogno per ventilazione è molto ridotto grazie all'efficienza dei dispositivi. La portata da assicurare è stata calcolata seguendo la UNI 10339 poiché il funzionamento della ventilazione meccanica controllata prevede che l'aria sia ricambiata in tutti gli ambienti contemporaneamente, quando uno di questi raggiunge i livelli di saturazione. In realtà la portata ottimale risulta più alta, come già indicato nel paragrafo, ma muovere masse di aria pari anche al doppio di quelle dimensionanti per la strategia 1 comporterebbe uno spreco notevole di energia, in quanto la scuola è attualmente occupata contemporaneamente per soli 5 ambienti su un totale di 14.

3.6.2. Analisi della strategia 2

La seconda strategia propone di garantire l'ottimale ricambio d'aria negli ambienti maggiormente frequentati nella scuola. Gli interventi proposti sono i seguenti:

- Smantellamento della UTA e della caldaia;
- Inserimento di dispositivi di ventilazione meccanica controllata decentralizzati con recuperatore di calore;
- Integrazione del sistema di riscaldamento con pannelli radianti a pavimento;
- Sostituzione della caldaia.

I dispositivi decentralizzati vengono scelti in base alle portate calcolate nella seguente figura.

Locali	Portata di aria per ambiente (mc/h)	Portata di aria totale (mc/h)
Aula 1-4	874.8	3499.2
Biblioteca	302.4	302.4
Aula 5-7	810	2430
Aula 8	567	567
Aula 9	631.8	631.8
Laboratori 1-2	399.6	799.2
Laboratori 3-4	453.6	907.2
Palestra	924	924
Refettorio	792	792
TOTALE		10852.8

Figura 74: Calcolo della portata di aria totale [fonte: mia elaborazione]

Nella scelta del dispositivo puntuale da inserire è stato tenuto conto della possibilità di collocarlo nel controsoffitto o in un armadio, questo perché le aule presentano delle ampie superfici vetrate e non c'è spazio per inserirlo a vista. Quindi si propone come centrale di ventilazione la "VEX308"¹²⁹ di Aldes Italia che garantisce portate fino a 850 m³/h. Le caratteristiche del dispositivo sono:

- La possibilità di installazione a vista o nel controsoffitto;
- Scambiatore di calore ad altissima efficienza;
- Rilevatore di CO₂ integrato;
- Filtrazione "M5" o "F7";
- Multi-velocità.

¹²⁹ La scheda tecnica è disponibile al link <https://www.aldes.it/img/2019/10/VEX308-catalogo.pdf>, consultata il 18/10/21

Le dimensioni del dispositivo sono le seguenti:

Modello	A (mm)	B (mm)	C (mm)	D (mm)	E (mm)	Peso (kg)
VEX308	2.075	840	500	315	1.320	203

Tabella 39 : Dimensioni VEX 308 [fonte: vedi nota 129]

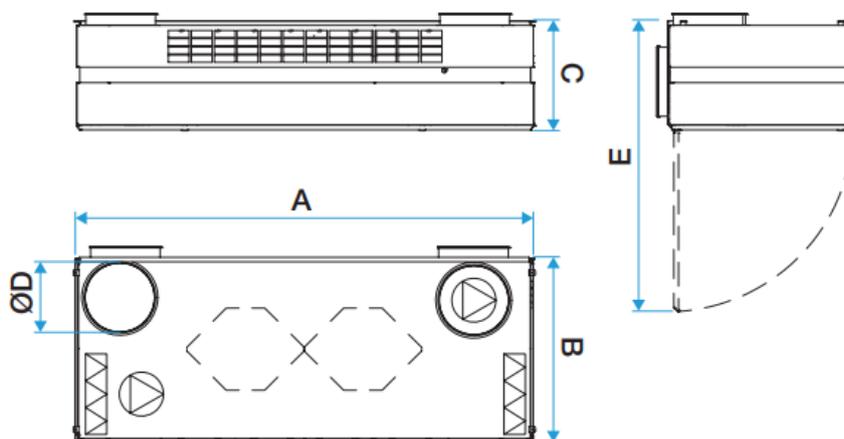
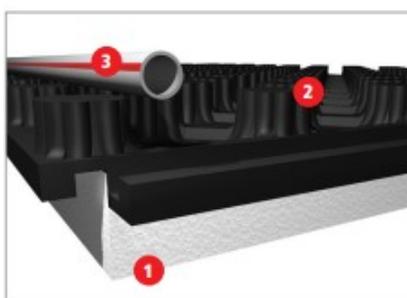


Figura 75: Dimensioni della VEX308 [fonte: vedi nota 129]

I dispositivi saranno inseriti all'interno nel controsoffitto e nascosti da questo. Inoltre rispetto alla strategia precedente, è possibile procedere per fasi successive: verranno per primi installati i sistemi decentralizzati nei locali effettivamente abitati, i laboratori e cinque delle nove aule totali, e in un secondo momento la restante parte. La scelta del sistema decentralizzato rende necessario nel caso della scuola il Gelso, un rifacimento anche dell'impianto di riscaldamento. Infatti, l'immissione dell'aria calda avveniva tramite il condotto aeraulico presente nei mobiletti ad induzione per contatto con una piastra riscaldata. Per il nuovo sistema, nell'ottica di garantire un comfort interno ottimale in tutti i punti interni dell'ambiente occupato, si ipotizza l'utilizzo di un sistema radiante a pavimento.



1. Lastra isolante in EPS.
2. Guaina protettiva nera.
3. Tubazione MidIX Plus a 5 strati.

Figura 76: Stratigrafia del sistema a pannelli radianti a pavimento [fonte: vedi nota 130]

La scelta è ricaduta sul sistema “EUROFLEX” di Eurotherm¹³⁰ pensato appositamente per il terziario. È costituito da tre elementi principali visibili in figura 78.

Quindi si inseriscono i dati relativi al nuovo impianto di ventilazione, che assicura una portata di 10.852,8 m³/h. La potenza è stata calcolata per lo scenario di massimo utilizzo in cui tutti i dispositivi funzionano contemporaneamente.

Ventilazione

Impostazioni avanzate

H - C - V

E' presente un flusso d'aria prelevato da esterno Potenza el. ventilatori [W]

Tipo di funzionamento

Tipologia di diffusore

Funzionamento ventilatori

Portata di immissione $q_{ve,sup}$ m³/h (max: 31 211.9 m³/h)

Portata di estrazione $q_{ve,est}$ m³/h (max: 31 211.9 m³/h)

Rendimento del recuperatore $\eta_{hru,eff}$ H C V (valore tra zero e uno)

Presente sistema di controllo di portata

Figura 77: Dati su ventilazione meccanica della strategia 2 [fonte: Termolog 12]

Vengono poi eliminati i terminali di emissione (ventilconvettori) sostituendoli con il sistema radiante a pavimento:

Sistema di emissione - Riscaldamento

Altezza locali fino a m *Seleziona in base all'altezza di zona*

Terminale di erogazione

Elenco delle strutture disperdenti contenenti i pannelli radianti

Strutture con stratigrafia

Struttura	U [W/(mK)]	Profon. posa [mm]	Percent. carico [%]
Pavimento su vespaio	1.138	50.0	50.0
SOLAIO INTERMEDIO	0.923	50.0	50.0

Terminali di emissione

Temperatura di mandata al terminale $\theta_{f,des}$ °C

Temperatura di ritorno dal terminale $\theta_{r,des}$ °C

Salto termico T $\Delta\theta_{des}$ °C *Salto termico tra T media del fluido e la T ambiente*

Figura 78: Dati sul sistema a pannelli radianti a pavimento [fonte: Termolog 12]

130 Scheda tecnica disponibile al link https://www.eurotherm.info/downloads/1113/413/IT_sistema_radiante_Euroflex.pdf, consultato il 20/10/2021

I pannelli radianti a pavimento hanno bisogno di una potenza pari a 67 kW, per questo deve essere sostituita la caldaia presente che ha una potenza di 550 kW con una meno potente. È possibile scegliere una caldaia a condensazione, ad esempio, il modello “Condens 7000 F GC7000F 75 R 23”¹³¹della Bosch con potenza utile nominale pari a 69 kW.

Figura 79: Dati sulla nuova caldaia a condensazione [fonte: Termolog 12]

Ricalcolando l’edificio si ottiene un fabbisogno di energia primaria pari a 110,9 kWh/m² annuo. Come per la strategia 1 si confrontano i valori dei fabbisogni di energia termica utili e gli scambi termici.

Fabbisogno di energia utile per (kWh/m ²)	Stato di fatto	Strategia 2
Riscaldamento (EPH,nd)	114,05	84,66
Raffrescamento (EPC,nd)	18,61	22,52
Acqua calda sanitaria (EPW,nd)	0,14	0,14
Ventilazione (EPV,nd)	31,32	10,60

Tabella 40 : Fabbisogno termico utile allo stato di fatto e per la strategia 1

[fonte: mia elaborazione da dati Termolog 12]

La strategia 2 permette di ridurre il fabbisogno di energia termica per ventilazione del 67% e per riscaldamento del 30%.

¹³¹ La scheda tecnica è disponibile al link <https://www.bosch-thermotechnology.com/it/it/ocs/commerciale-e-industriale/condens-7000-f-732009-p/> , consultato il 20/10/21

Stagione di riscaldamento		QH,tr (kWh)	QH,ve (kWh)	QH,ht (kWh)
	Sdf	214.039,2	65.927,4	279.996,6
	S2	214.039,2	15.708,5	229.747,6
Stagione di raffrescamento		QC,tr (kWh)	QC,ve (kWh)	QC,ht (kWh)
	Sdf	37.104,1	10.024,6	47.128,7
	S1	55.437,2	3.709,4	59.146,7

Tabella 41: Scambi termici per trasmissione e per ventilazione [fonte: mia elaborazione da dati Termolog 12]

Analogamente alla strategia 1 gli scambi per ventilazione sono ridotti del 77% in stagione di riscaldamento e del 65% in quella di raffrescamento.

3.7. Confronto delle due strategie

Entrambe le strategie hanno come principale finalità il miglioramento della qualità dell'aria all'interno degli ambienti costituenti il plesso il Gelso. Ogni strategia viene valutata secondo i seguenti parametri: la risoluzione o il miglioramento delle criticità ante intervento, i vantaggi e gli svantaggi che la tipologia di dispositivo comporta.

La **strategia 1** che prevede appunto l'installazione di un dispositivo di ventilazione meccanica controllata centralizzata risolve le seguenti problematiche:

- Il tasso di ricambio dell'aria passa da 1,68 vol/h a 2,3 vol/h o 2,5 vol/h;
- Estrazione dell'aria satura di anidride carbonica;
- Filtrazione dell'aria in entrata tramite filtri ad altissima efficienza;
- Riduzione dell'energia termica utile per riscaldamento grazie al recuperatore di calore.

Mentre non sono risolte le criticità relative a:

- Asimmetria radiante negli ambienti, perché viene mantenuto il sistema di riscaldamento presente nella scuola, che provoca sensazione di discomfort se l'occupante è molto vicino o molto lontano dalla fonte di calore;

La ventilazione meccanica centralizzata non permette il ricambio in un solo ambiente dell'edificio, ma se un'aula raggiunge il livello di anidride carbonica limite, il ricambio avviene in tutti gli ambienti. Quindi è necessaria una valutazione in funzione anche dell'occupazione della scuola:

- L'edificio è composto da nove aule per la didattica frontale e cinque laboratori, il che significa che nello scenario di occupazione massima della scuola sono nove gli ambienti occupati contemporaneamente;
- Attualmente sono occupate cinque delle nove aule.

Perciò nel caso in cui le cinque aule raggiungano il livello di saturazione, il ricambio dell'aria avviene per ulteriori nove ambienti non occupati ed anche per la palestra e per la mensa. La ventilazione meccanica centralizzata è vincolata ad assicurare il totale della portata di progetto senza considerare se gli ambienti sono occupati o meno; quindi, può risultare un sistema molto efficace nel momento in cui tutti gli ambienti sono occupati nello stesso arco di tempo. Inoltre, di fondamentale importanza per l'impianto centralizzato è la regolare pulizia e manutenzione di tutti i componenti. Devono infatti essere eseguite ispezioni periodiche all'unità di ventilazione, alle condizioni igieniche dei filtri, verifiche sulla

rispondenza delle portate d'aria, delle condizioni di rumorosità, delle prestazioni dei ventilatori. I canali devono essere mantenuti sempre puliti altrimenti può esservi un problema di contaminazione dell'aria che poi viene immessa negli ambienti. Tuttavia, questo intervento risulta non molto invasivo in quanto la scuola presenta già delle forature per il passaggio dei condotti della unità trattamento dell'aria e i controsoffitti dove nascondere le canalizzazioni. I terminali di entrata sono già presenti e vengono installati solo quelli di ripresa. Si può ipotizzare una stima presuntiva dei costi considerando gli elementi principali:

- La centrale di ventilazione¹³²;
- I canali di collegamento con le rispettive metrature¹³³;
- I terminali (vedi nota 77);
- I sensori di CO₂ (vedi nota 76).

In tabella sono presenti le varie voci e la quantità o metratura di ogni elemento:

	Euro al pezzo	Euro al metro	Euro per tre metri	Numero di pezzi	Metratura totale	Totale
VEX 780T	24843			1		24843
ALFLEX ALU 500 mm			161		10	1610
ALGAINE ALU INSO 406 mm		31.1			192	5963.52
ALGAINE ALU INSO 305 mm		20.9			50	1045
ALGAINE ALU INSO 203 mm		13.7			420	5766.6
PLENUM TRA CANALE E BOCCHETTA LRE 842 FO	84.2			44		3704.8
ANELLO DI MONTAGGIO PER DIFFUSORE	7.98			44		351.12
DIFFUSORI CIRCOLARI SC 831 160 mm	23.1			44		1016.4
SENSORI CO2	406			14		5684
						49984.4

Figura 80: Stima del costo d'intervento 1 [fonte: mia elaborazione]

Quindi dividendo il totale per il numero di aule presenti si ottiene il costo per aula pari a 3.125 €.

La **strategia 2** prevede l'installazione di unità di ventilazione meccanica controllata decentralizzate per ogni aula ed un sistema di riscaldamento a pannelli radianti a pavimento. Le criticità che vengono risolte sono:

- Il tasso di ricambio dell'aria passa da 1,68 vol/h ad uno fino a 4,9 vol/h;
- Estrazione dell'aria viziata;
- Filtrazione dell'aria ad altissima efficienza;

¹³² I prezzi della centrale di ventilazione e dei sensori di anidride carbonica sono stati trovati sul listino Aldes per il terziario del 2019, disponibile al link https://agenziadelfabro.it/wp-content/uploads/2019/08/2019-Aldes-Terziario-LISTINO_26.06.pdf, consultato il 28/10/21

¹³³ I prezzi per i canali di collegamento e i terminali sono stati trovati sul catalogo di Aldes del 2012, disponibile al link <https://docplayer.it/9820014-Dal-1-marzo-2012-aumento-3-catalogo-listino-2011-diffusione-aria-edizione-novembre-2011.html>, consultato il 28/10/21

- Riduzione dell'energia termica utile per riscaldamento grazie al recuperatore di calore;
- Eliminazione delle condizioni di discomfort termico grazie alla distribuzione uniforme indotta dal sistema radiante a pavimento.

La strategia 2 porta ad un miglioramento complessivo delle criticità presenti nella scuola. Questo sia grazie all'installazione di macchine decentralizzate con le quali si possono garantire portate più elevate sia al nuovo sistema di riscaldamento. Questa strategia è stata ipotizzata perché consente di avere un sistema di ventilazione autonomo per ogni ambiente che permette il ricambio dell'aria quando i relativi sensori raggiungono i livelli limite. I dispositivi possono essere tenuti accesi nel caso in cui le aule siano occupate e spenti nel momento in cui queste siano vuote. Quindi vi è sicuramente una maggiore libertà e flessibilità che comporta però un fabbisogno di energia per ventilazione maggiore rispetto a quella centralizzata (figura 85). Per quanto riguarda il sistema di riscaldamento, i pannelli radianti a pavimento garantiscono una diffusione del calore dal basso verso l'alto da cui consegue una condizione ottimale di comfort all'interno degli ambienti (figura 82).

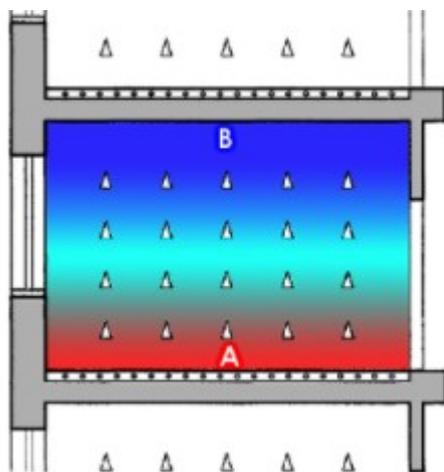


Figura 81: Distribuzione del calore dei pannelli radianti a pavimento
 [fonte: http://www.efestoclima.it/pavimenti_radianti/vantaggi_pavimenti_radianti.php]

Se dal punto di vista di miglioramento della qualità *indoor* la strategia 2 risulta migliore rispetto alla strategia 1, gli interventi proposti sono più invasivi. L'installazione a pavimento del sistema radiante comporta una demolizione e ricostruzione del pavimento e degli strati sottostanti presenti. Inoltre, considerando che il pavimento radiante prevede un fabbisogno di potenza minore rispetto alla caldaia presente, è necessario tenere conto anche della sostituzione del generatore esistente.

Quindi questa strategia richiederà tempistiche di realizzo maggiori rispetto alla prima e risulterà maggiormente invasiva. Si può stimare presuntivamente il costo dell'intervento tenendo conto dei seguenti elementi:

- L'unità di ventilazione¹³⁴;
- Il pavimento radiante¹³⁵;
- La nuova caldaia¹³⁶.

In tabella sono presenti le varie voci e la quantità o metratura di ogni elemento:

	Euro al pezzo	Euro al mq	Numero di pezzi	Metratura totale	Totale
VEX308	3990		16		63840
PAVIMENTO EUROFLEX		26.9		834	22434.6
CALDAIA Condens 7000 F GC7000F 75 R 23	9064				9064
					95338.6

Figura 82: Calcolo del costo dell'intervento 2 [fonte: mia elaborazione]

Dividendo il costo totale per il numero di aule presenti nell'edificio si ottiene il totale per aula pari a 5.958 €.

Di seguito sono riportate due tabelle, una per ogni strategia, con una descrizione riassuntiva degli interventi proposti e rispettivi vantaggi e svantaggi.

STRATEGIA 1	Interventi:	<ul style="list-style-type: none"> • Smantellamento della UTA • Installazione della VMC centralizzata • Installazione di sensori di CO₂ per aula
	Pro:	<ul style="list-style-type: none"> • Buon ricambio d'aria • Costo medio (circa 3.125 €/aula) • Tempi di installazione brevi • Intervento poco invasivo
	Contro:	<ul style="list-style-type: none"> • Possibile discomfort causato da asimmetria radiante • Manutenzione impegnativa • Ricambio d'aria continuo in tutte le aule

Tabella 42: Descrizione sommaria della strategia 1 [fonte: mia elaborazione]

¹³⁴ Il prezzo dell'unità ventilante VEX308 non è disponibile sui listini; perciò, è stato considerato un dispositivo con portata simile DFE ED 850 presente sui listini Aldes 2019, disponibile al link https://agenziadelfabro.it/wp-content/uploads/2019/08/2019-Aldes-Terziario-LISTINO_26.06.pdf, consultato il 28/10/21

¹³⁵ Il prezzo del pavimento radiante si può trovare sul sito di Eurotherm al seguente link <https://www.eurotherm.info/it/guida-alla-scelta?v=103#>, consultato il 28/10/21

¹³⁶ Il prezzo della caldaia Bosch si può trovare sul catalogo del 2021 disponibile al link <https://www.bosch-thermotechnology.com/it/it/residenziale/informazioni/documentazione/catalogo-prodotti/>, consultato il 28/10/21

STRATEGIA 2	Interventi:	<ul style="list-style-type: none"> • Smantellamento della UTA • VMC puntuale per ogni ambiente • Riscaldamento con sistema radiante a pavimento • Sostituzione della caldaia
	Pro:	<ul style="list-style-type: none"> • Ottimo ricambio d'aria • Comfort interno • Manutenzione facile • Ricambio d'aria quando è necessario per singolo ambiente
	Contro:	<ul style="list-style-type: none"> • Investimento iniziale alto (circa 5.958 €/aula) • Tempi di installazione medi • Intervento invasivo

Tabella 43: Descrizione sommaria della strategia 2 [fonte: mia elaborazione]

Dati a confronto

Si riportano infine i grafici di confronto delle due strategie con lo stato di fatto, riguardanti il fabbisogno di energia termica utile per riscaldamento, per ventilazione e gli scambi termici per ventilazione.

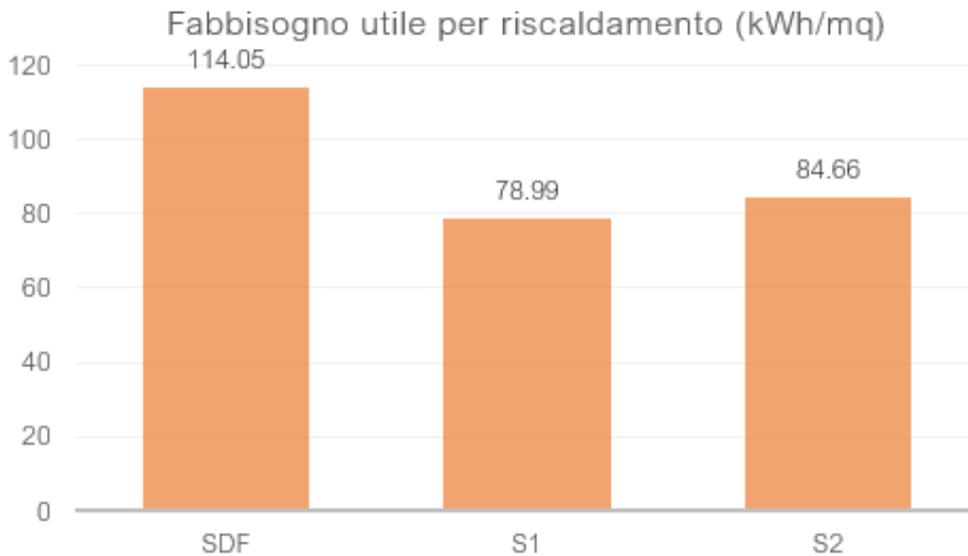


Figura 83: Confronto del fabbisogno utile per riscaldamento [fonte: mia elaborazione]

Gli scambiatori di calore hanno un'efficienza simile, il che comporta una riduzione sul fabbisogno di riscaldamento simile, nella **strategia 1** si ha una riduzione del 30%, mentre nella **strategia 2** del 26%.

Anche il fabbisogno utile per ventilazione subisce una riduzione, in particolare nella **strategia 1** per la presenza di un unico macchinario.

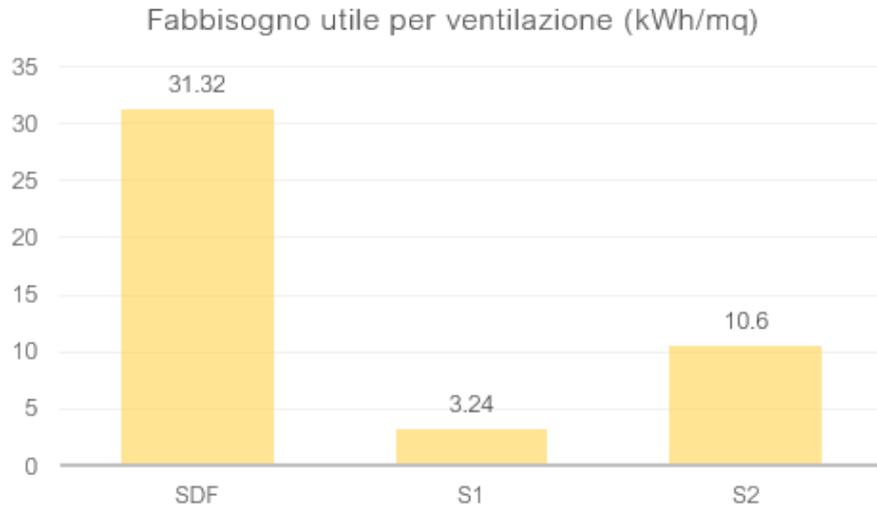


Figura 84: Confronto del fabbisogno utile per ventilazione [fonte: mia elaborazione]

Passando da un sistema ibrido ad uno interamente meccanico si riducono le dispersioni dovute alla ventilazione. La restante parte rappresenta la dispersione per ventilazione dovuta ai serramenti presenti nella scuola che non sono stati sostituiti. Questi elementi sono altamente disperdenti sia in termini di ventilazione che di calore: presentano un telaio in alluminio con vetro singolo e sono di dimensioni notevoli. Ipotizzando la sola installazione della ventilazione meccanica la quota parte di scambi per ventilazione si riduce comunque dell'80% in stagione di riscaldamento e del 75% in quella di raffrescamento.



Figura 85: Confronto tra gli scambi termici per ventilazione [fonte: mia elaborazione]

3.8. Considerazioni finali ed esito dell'analisi

Andiamo quindi a riassumere tramite una tabella i punti di forza e di debolezza delle due strategie a confronto:

	Strategia 1	Strategia 2
Qualità dell'aria	Buona	Ottima
Filtrazione	Ottima	Ottima
Comfort termico indoor	Possibile discomfort	Ottimo
Tempi di installazione	Brevi	Medi
Manutenzione	Molto impegnativa	Poco impegnativa
Costi	Medi	Alti

Tabella 44: Confronto tra le due strategie [fonte: mia elaborazione]

Non è possibile determinare in assoluto una strategia vincente, ma ciò dipende essenzialmente dal parametro che viene scelto come determinante. Se come principale parametro si sceglie il miglioramento della qualità dell'aria, allora la strategia 2 è la migliore, considerando che la VMC decentralizzata ricambia l'aria nel momento in cui i sensori di CO₂ rilevano il livello di saturazione e permette di lavorare con portate più elevate rispetto a quelle della strategia 1. In questo caso specifico non è possibile implementare una decentralizzata se non smantellando tutto l'impianto di riscaldamento esistente, essendo la ventilazione parte integrante del sistema di riscaldamento. Ne deriva che l'intervento sarà abbastanza invasivo e richiederà dei tempi di installazione più lunghi rispetto a quelli della strategia 1. Se invece il parametro determinante è il tempo la prima strategia risulta la migliore da attuare, anche perché tempi molto lunghi necessitano di una riorganizzazione in didattica a distanza delle varie attività. Ovviamente un parametro da considerare è il costo complessivo dell'intervento; attualmente in conseguenza dell'emergenza COVID alcune regioni hanno stanziato dei finanziamenti per l'installazione nelle scuole di impianti di ventilazione meccanica controllata.

Un esempio è il decreto del 23 febbraio 2021¹³⁷ della regione Marche, che prevede una spesa di circa 4.000 euro per aula.

Quindi nella scelta finale di una strategia è necessario mettere a sistema tanti parametri che non sempre consentono il raggiungimento della prestazione migliore, ma tengono conto della fattibilità reale dell'intervento.

¹³⁷ DDPF n.7 del 23.02.2021 - *Intervento straordinario per lo svolgimento in sicurezza delle attività didattiche a seguito dell'emergenza sanitaria da Covid-19 attraverso l'installazione nelle aule scolastiche di impianti di ventilazione meccanica, disponibile al link [https://www.regione.marche.it/portals/0/Paesaggio_Territorio_Urbanistica/WMCX/DecretoDirigente%20UPT%20\(VMC\).docx.pdf](https://www.regione.marche.it/portals/0/Paesaggio_Territorio_Urbanistica/WMCX/DecretoDirigente%20UPT%20(VMC).docx.pdf), consultato il 25/10/21*

Conclusioni

Attualmente la vita si svolge per la maggior parte in ambienti confinati tra scuola, lavoro e famiglia. È di fondamentale importanza quindi garantire la qualità dell'aria all'interno di questi spazi. La ventilazione meccanica controllata è un sistema impiantistico che risponde in pieno a questa esigenza, assicurando in maniera "scientifica" il rispetto del requisito di salubrità dell'aria all'interno di ambienti confinati a diversa destinazione d'uso. In particolare, quando si parla di edifici scolastici in cui gli alunni passano anche otto ore al giorno, è necessario che vi siano le condizioni ottimali per favorire la concentrazione e la salute degli occupanti, trattandosi di soggetti considerati fragili. Il problema esiste già da tempo, sono numerosi gli studi che correlano le difficoltà respiratorie e di concentrazione dei bambini alla qualità dell'aria all'interno degli ambienti dove soggiornano. La pandemia da Sars Covid 2019 ha reso più evidente ed urgente la progettazione di una soluzione adeguata al problema. Attualmente il rientro nelle scuole in sicurezza è una tematica molto discussa in quanto è importante per lo sviluppo complessivo del bambino vivere l'ambiente scolastico in presenza ed essere consapevole di ciò che lo circonda. In sintesi, i vantaggi legati all'installazione di un dispositivo di ventilazione meccanica controllata con recupero termico sono:

- **MAGGIORI PORTATE DI RICAMBIO ARIA:** soddisfacimento delle esigenze di elevate portate di ricambio, considerando che la scuola è un ambiente molto affollato con un alto numero di ore di occupazione;
- **MAGGIORE SALUBRITA' E COMFORT TERMICO-ACUSTICO:** In molti casi la ventilazione naturale non è in grado di garantire né la salubrità dell'aria, perché quella esterna è ricca di inquinanti, né il comfort termico ed acustico degli occupanti, dipendendo da fattori contestuali estremamente variabili;
- **FILTRAZIONE SOSTANZE INQUINANTI:** I filtri presenti all'interno dei dispositivi di ventilazione meccanica controllata garantiscono un elevato livello di qualità dell'aria immessa, in particolare quelli di ultima generazione trattengono anche le particelle più piccole e dannose del particolato atmosferico (PM₁₀);
- **ATTIVAZIONE AUTOMATICA DEL RICAMBIO ARIA:** la ventilazione meccanica è provvista di sensori di rilevamento della quantità di anidride carbonica negli ambienti e assicura il ricambio quando l'aria è satura;

- **RISPARMIO ENERGETICO:** la ventilazione meccanica riduce le dispersioni rispetto a quella naturale, in quanto l'apertura delle finestre comporta la dispersione di calore verso l'esterno.

Il parco di edilizia scolastica italiano presenta notevoli carenze sotto il punto di vista della qualità dell'aria, sono ancora poche le scuole provviste di un impianto di ventilazione meccanica controllata. Alcuni studi condotti a livello regionale dimostrano che all'interno delle aule scolastiche i livelli di inquinanti sono ben oltre le soglie imposte da normativa causando effetti negativi sul rendimento degli alunni. Il Gruppo Nazionale di Inquinamento *Indoor* dell'Istituto Superiore di Sanità fornisce indicazioni volte a migliorare la qualità dell'aria interna negli ambienti scolastici attraverso il corretto ricambio d'aria, l'utilizzo di arredi e materiali a bassa emissione di inquinanti e l'attivazione di programmi di tipo educativo e formativo per studenti e personale sui potenziali rischi per la salute causati dall'inquinamento. I tassi di ventilazione svolgono quindi un ruolo fondamentale ed il miglior modo per garantirli è un sistema di areazione forzata. Le potenzialità di questo sistema risiedono nell'assicurare contemporaneamente il ricircolo di aria salubre, l'attenuazione dei rumori proveniente dall'esterno e il risparmio energetico nel caso in cui il dispositivo sia provvisto di recuperatore di calore. Quindi, l'impegno da sostenere per gli istituti scolastici e le amministrazioni locali non dovrebbe essere solo finanziario ma anche di ripensamento delle scuole sotto il punto di vista della salubrità e della sostenibilità ambientale e potrebbe diventare la leva di un cambiamento importante.

Bibliografia

Agenzia provinciale per l'ambiente e la tutela del clima, *Aria viziata a scuola| Iniziativa*, Provincia autonoma di Bolzano, disponibile al link <https://ambiente.provincia.bz.it/progetti/aria-viziata-a-scuola-iniziativa.asp#dettagli-misure>, consultato il 15/07/2021

Antonini, E & Boeri, A (2011), *Progettare scuole sostenibili: criteri, esempi e soluzioni per l'efficienza energetica e la qualità ambientale*, EdicomEdizioni, Monfalcone.

ARPAE, (2021), *Qualità dell'aria, le nuove linee guida OMS*, disponibile al link <https://www.arpae.it/it/notizie/qualita-dellaria-le-nuove-linee-guida-oms>, consultato il 05/10/2021

Associazione Italiana di Acustica, (2017), *Linee guida per una corretta progettazione acustica di ambienti scolastici*, disponibile al link <https://www.portaleagentifisici.it/filemanager/userfiles/rumore/documentazione/AIAebook-Linee-guida-per-una-corretta-progettazione-acustica-di-ambienti-scolastici.pdf?lg=IT>, consultato il 27/06/2021

Bianchi, F et al, (2009), *Definizione degli indici e livelli di fabbisogno dei vari centri di consumo energetico degli edifici adibiti a scuole - consumi energetici delle scuole primarie e secondarie*, disponibile al link https://www.enea.it/it/Ricerca_sviluppo/documenti/ricerca-di-sistema-elettrico/governance/rse119.pdf, consultato il 23/06/2021

Boarin, P (2010), *Edilizia scolastica: riqualificazione energetica e ambientale: metodologie operative, requisiti, strategie ed esempi per gli interventi sul patrimonio esistente*, Edicom, Monfalcone.

Busa, L (2020), *Progettare l'aria: Salute e salubrità negli ambienti indoor*, Maggioli Editore, Santarcangelo di Romagna.

Buttà, C (2013), *Seminario di aggiornamento tecnico – VMC le nuove tecnologie*, disponibile al link http://portale.assimpredilance.it/uploads/allegati/4_Edificio_intelligente_ALDES_26mar13.pdf, consultato il 20/08/2021

Calone, E, a cura di, (2014), *Edilizia scolastica: riqualificazione, messa a norma, procedure*, Wolters Kluwer Italia, Milanofiori-Assago

Campolucci, S & Leardini M – *Educazione sostenibile – Progetto di riqualificazione del complesso scolastico Ponte Pietra a Cesena* – Tesi di laurea specialistica a ciclo unico, Alma Mater Studiorum – Università di Bologna, A.A. 2011/2012, Relatore: Boeri A.

Comune di Merano, (2019), *Scuola Wolf: concluso il risanamento energetico*, disponibile al link

https://www.comune.merano.bz.it/it/Scuola_Wolf_concluso_il_risanamento_energetico, consultato il 22/08/2021

De Santoli, L & Mancini, F (2017), *La progettazione degli impianti di climatizzazione*, Maggioli, Santarcangelo di Romagna.

Dolce M & Martinelli A (A cura di), (2005), *Inventario e vulnerabilità degli edifici pubblici e strategici dell'Italia centro-meridionale, Vol. I – Caratteristiche tipologiche degli edifici per L'Istruzione e la Sanità*, INGV/GNDT-Istituto Nazionale di geofisica e Vulcanologia / Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti, L'Aquila, disponibile al link <http://jargo.itim.mi.cnr.it/pubblicazioni/Volume1/Volume1.pdf>, consultato il 20/06/2021

Doninelli, M & Doninelli, M (2006), *Tabelle e diagrammi perdite di carico aria*, Quaderni Caleffi, disponibile al link <https://www.caleffi.com/sites/default/files/file/aria.pdf>, consultato il 26/10/21

EPA, *NAAQS Table*, consultabile al <https://www.epa.gov/criteria-air-pollutants/naqs-table>, consultato il 30/06/2021

Ferrarini, M (2018), *VMC: sei motivi per sceglierla*, disponibile all'indirizzo <https://www.ediltecnico.it/56631/vmc-ventilazione-meccanica-controllata/>, consultato il 22/07/2021
Dolce M & Martinelli A (A cura di), (2005), *Inventario e vulnerabilità degli edifici pubblici e strategici dell'Italia centro-meridionale, Vol. I – Caratteristiche tipologiche degli edifici per L'Istruzione e la Sanità*, INGV/GNDT-Istituto Nazionale di geofisica e Vulcanologia / Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti, L'Aquila, disponibile al link <http://jargo.itim.mi.cnr.it/pubblicazioni/Volume1/Volume1.pdf>, consultato il 20/06/2021

Fondazione Giovanni Agnelli (2020), *Rapporto sull'edilizia scolastica*, Editori Laterza & Figli Spa, Bari-Roma.

Fotache, G - *Qualità dell'ambiente interno e comportamento energetico di un edificio adibito ad uffici – applicazione della EN 16798-1* – Tesi di laurea magistrale, Politecnico di Torino, A.A. 2018/2019, Relatore: Corrado V.

Giachetta, A (2005), Corso di progettazione bioclimatica – modulo: tecnologie bioclimatiche - *Raffrescamento passivo e controllo della ventilazione in ambienti confinati* - Università di Genova, facoltà di Architettura. Disponibile al link <https://architettura.unige.it/did/12/architettura/quarto0506/progettbioclimatica/matdid/32.pdf>, consultato il 18/07/2021

GlobalABC, *2020 Global status report for buildings and construction – Towards a zero emissions, efficient and resilient buildings and construction sector*, disponibile al link https://globalabc.org/sites/default/files/inline-files/2020%20Buildings%20GSR_FULL%20REPORT.pdf, consultato il 22/06/2021

Helty, (2021), *Rientro a scuola in sicurezza con Helty*, disponibile al link https://www.edilportale.com/news/2021/01/aziende/rientro-a-scuola-in-sicurezza-con-helty_80615_5.html, consultato il 25/08/2021

Istituto Superiore di Sanità, (2021), *Indicazioni ad interim per la prevenzione e gestione degli ambienti indoor in relazione alla trasmissione dell'infezione da virus SARS-CoV-2. Aggiornamento del Rapporto ISS COVID-19 n. 5/2020 Rev. 2*, disponibile al link https://www.iss.it/documents/20126/0/Rapporto+ISS+COVID-19+11_2021.pdf/3f0cd575-f744-9907-c8e4-5ab5f01d5c61?t=1622462865916, consultato il 10/08/2021

Legambiente, (2020), *XX Rapporto Ecosistema Scuola – Se non riparte la scuola non riparte il paese*, disponibile al link <https://www.legambiente.it/wp-content/uploads/2021/03/Ecosistema-scuola-2021.pdf>, consultato il 23/06/2021

MATTM, (2012), *Qualità dell'aria nelle scuole: un dovere di tutti, un diritto dei bambini*, consultabile al link <https://www.isprambiente.gov.it/files/progetti/qualitadellarianellescuole.pdf>, consultato il 26/06/2021

MIUR - Ufficio Gestione Patrimonio Informativo e Statistica, (2019), *Focus "Principali dati della scuola – Avvio Anno Scolastico 2019/2020"*, disponibile al link <https://www.miur.gov.it/documents/20182/0/Principali+dati+della+scuola+-+avvio+anno+scolastico+2019-2020.pdf/5c4e6cc5-5df1-7bb1-2131-884daf008088?version=1.0&t=1570015597058>, consultato il 15/06/2021

MIUR, (2021), *Istruzioni per la compilazione della scheda di rilevazione del patrimonio di edilizia scolastica*, disponibile al link https://www.istruzione.it/edilizia_scolastica/allegati/Manuale%20Compilazione%20Scheda%20Edificio%20Scolastico%202021.pdf, consultato il 18/06/21

Oleotto, E & Picotti, M (2015), *La ristrutturazione delle scuole: soluzioni strutturali, impiantistiche e per il risparmio energetico*, D. Flaccovio Editore, Palermo.

Pepe, D & Rossetti, M (2016), *Progetti di scuole innovative*, Maggioli Editore, Santarcangelo di Romagna.

Raisa, V & Schiavon, S & Zecchin, R (2010), *Teoria e tecnica della ventilazione: soluzioni per l'edilizia residenziale e per il piccolo terziario*, Delfino, Milano.

Ricciu, R (2012-13), *L.I. di progettazione tecnica e strutturale 2012-13 - La ventilazione*, Università degli studi di Cagliari, Facoltà di Architettura. Disponibile all'indirizzo: https://people.unica.it/robertoricciu/files/2013/04/2013_04_17_La-ventilazione.pdf, consultato il 18/07/2021

Romano D, (2020), *L'andamento delle emissioni nazionali di gas serra*, disponibile al link <https://www.isprambiente.gov.it/files2020/eventi/gas-serra/romano.pdf>, consultato il 23/06/2021

Spirandelli, B (2020), *Progettare edifici passivi con materiali naturali*, Legislazione tecnica, Roma.

Stefanutti, L, direzione e coordinamento di, (2007), *Manuale degli impianti di climatizzazione*, Tecniche Nuove, Milano.

WHO, (2005), *Air Quality Guidelines-Global Update*, disponibile all'indirizzo https://www.euro.who.int/data/assets/pdf_file/0005/78638/E90038.pdf, consultato il 05/10/2021

WHO, (2021), *Air Quality Guidelines*, disponibile all'indirizzo <https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/345329/9789240034228-eng.pdf?sequence=1&isAllowed=y>, consultato il 05/10/2021

WHO, (2009), *Natural Ventilation for Infection Control in Health-Care Settings*, Disponibile all'indirizzo:

https://www.who.int/water_sanitation_health/publications/natural_ventilation.pdf, consultato il 27/07/2021

Fonti normative

ANSI/ASHRAE Standard 62-2001: *Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality*

ANSI/ASHRAE Standard 62.1-2019 – *Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality*

Decreto del Presidente del Consiglio e dei Ministri del 5 dicembre 1997 - *Determinazione dei requisiti acustici passivi degli edifici*

Decreto Ministeriale del 18 dicembre 1975 - *Norme tecniche aggiornate relative all'edilizia scolastica, ivi compresi gli indici di funzionalità didattica, edilizia ed urbanistica, da osservarsi nella esecuzione di opere di edilizia scolastica*

Decreto Ministeriale del 26 giugno 2015 - *Adeguamento linee guida nazionali per la certificazione energetica degli edifici*

Direttiva 2008/50/CE del Parlamento Europeo e del Consiglio, del 21 maggio 2008, relativa alla qualità dell'aria ambiente e per un'aria più pulita in Europa, Allegato XIV- Obiettivo nazionale di riduzione dell'esposizione, valore-obiettivo e valore limite per il PM_{2.5}

L. 30 marzo 1976, n. 373

L. 9 gennaio 1991, n. 10

MIUR, 2013 - *Norme tecniche-quadro, contenenti gli indici minimi e massimi di funzionalità urbanistica, edilizia, anche con riferimento alle tecnologie in materia di efficienza e risparmio energetico e produzione da fonti energetiche rinnovabili, e didattica indispensabili a garantire indirizzi progettuali di riferimento adeguati e omogenei sul territorio nazionale.*

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

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

UNI 10840:2007 - *Luce e illuminazione - Locali scolastici - Criteri generali per l'illuminazione artificiale e naturale*

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

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

UNI EN ISO 16890:2017 - *Filtri d'aria per ventilazione generale - Parte 1: Specifiche tecniche, requisiti e sistema di classificazione dell'efficienza basato sul particolato (ePM)*

Sitografia

<https://www.aldes.it/>

<https://www.arpae.it/it>

<https://www.ashrae.org/>

<https://www.bosch.it/>

<https://it.climate-data.org/>

<https://www.ediltecnico.it/>

<https://www.enea.it/it>

<https://www.epa.gov/>

<https://www.europarl.europa.eu/portal/it>

<https://www.eurotherm.info/it/>

<https://www.gazzettaufficiale.it/>

<https://globalabc.org/>

<https://gml.noaa.gov/>

<https://www.isprambiente.gov.it/it>

<https://www.iss.it/>

https://www.istruzione.it/edilizia_scolastica/index.shtml

<https://www.legambiente.it/>

<https://www.logical.it/>

<https://www.mite.gov.it/pagina/mattm>

<https://www.miur.gov.it/>

https://miurjb16.pubblica.istruzione.it/pes/?pk_vid=f675ae777dab574c163653567864aa6a

<https://www.provincia.bz.it/it/>

<https://www.uni.com/>

<https://www.vmcgroup.it/>

<https://www.wavin.com/it-it>

<https://www.who.int/>

<https://www.zehnder.it/>

Ringraziamenti

Con questa tesi si conclude il mio percorso universitario, un'esperienza che ha segnato la mia vita significativamente. È stato un periodo caratterizzato da molto impegno ma anche da momenti ed emozioni speciali e conoscenze che spero di portare avanti per la vita. Vorrei quindi ringraziare tutte le persone che mi hanno accompagnata lungo questo percorso.

Ringrazio mia sorella per essere il mio faro quando mi trovo in alto mare e la mia voce di incoraggiamento a dare il massimo.

Ringrazio i miei genitori per avermi sostenuta e aver affrontato insieme a me le fatiche dello studio nel quotidiano.

Ringrazio Fabiola, Valentina, Cristiana, Myriam e Alessandra perché il nostro legame rimane saldo nonostante gli anni che passano.

Vorrei ringraziare le mie amiche Silvia, Valeria, Lucrezia, Francesca e Irene con cui ho condiviso tantissime esperienze e momenti indelebili.

Ringrazio Benedetta con cui ho condiviso non solo tutti gli esami della triennale ma tante chiacchierate e serate divertenti che non scorderò mai.

Ringrazio Maria per avermi aiutata a vivere la vita con più leggerezza ed avermi sempre incoraggiata.

Ringrazio Carolina e Luca con cui ho condiviso tante ore in biblioteca ma altrettante sul terrazzo a cantare.

Vorrei ringraziare le mie amiche Ambra, Giulia, Alessia, Elisa, Alessia, Grazia e Luisa che ho conosciuto a Ravenna e con cui abbiamo condiviso giornate intere di studio ma anche di divertimento.

Ringrazio Letizia e le mie coinquiline di Ravenna per avermi sopportata in casa e per avermi sempre strappato un sorriso.

Ringrazio tutte le persone che ho conosciuto durante il mio Erasmus a Lisbona, in particolare Diana, Monia, Elisa, Ilaria, Lance, Edoardo e Gianluca per aver reso l'esperienza unica ed indimenticabile.

Vorrei ringraziare Miguel Amado per avermi dato l'opportunità di lavorare all'interno del suo studio in Portogallo e João Copio per essere stato un referente molto attento e disponibile.

Ringrazio il mio relatore, il prof. Antonini e il mio correlatore, il prof. Barbolini per avermi dato l'opportunità di sviluppare questo lavoro di tesi e per la loro professionalità disponibilità.

Ringrazio l' Arch. Giovanna Amista di Zehnder Group Italia S.r.l. per la sua cortesia e per avermi fornito preziose informazioni per la realizzazione della tesi.

Ringrazio i miei amici Federico, Valentina, Natasha, Alessandro e Matteo che, anche se conosco da poco, hanno vissuto con me questi mesi impegnativi facendomi sempre distrarre.

Ringrazio tutti per essermi stati vicini.

Caterina