

Riccardo Casaburi
Fabrizio Prato
Dario Vineis

Con la collaborazione di: Andrea Tessari

MANUALE PRATICO PER LA PROGETTAZIONE SOSTENIBILE

*Con il supporto tecnico scientifico di: ClimAbita
Prefazione a cura di: Norbert Lantschner*

1^a edizione

 Legislazione Tecnica

© Copyright Legislazione Tecnica 2016

La riproduzione, l'adattamento totale o parziale, la riproduzione con qualsiasi mezzo, nonché la memorizzazione elettronica, sono riservati per tutti i paesi.

Editor: Giuseppe Rosa - g.rosa@legislazionetecnica.it

Finito di stampare nel mese di ottobre 2016 da

Press Up S.r.L. - Sede Legale: Via Catone, 6 - 00192 Roma (Rm)

Sede Operativa: Via Cassia Km 36,300 Zona Ind.le Settevene - 01036 Nepi (Vt)

Legislazione Tecnica S.r.L.

00144 Roma, Via dell'Architettura 16

Servizio Clienti

Tel. 06/5921743 - Fax 06/5921068

servizio.clienti@legislazionetecnica.it

Portale informativo: www.legislazionetecnica.it

Shop: itshop.legislazionetecnica.it

I contenuti e le soluzioni tecniche proposte sono espressioni dell'esperienza maturata nel corso degli anni dagli Autori. Esse possono, quindi, soltanto essere fatte proprie dal lettore, o semplicemente rigettate, ed hanno l'intento di indirizzare e supportare il tecnico nella scelta della soluzione che maggiormente si adatta alla situazione oggetto di analisi. Rimane, pertanto, a carico del tecnico la selezione della soluzione da adottare. Il lettore utilizza il contenuto del testo a proprio rischio, ritenendo indenne l'Editore e gli Autori da qualsiasi pretesa risarcitoria.

INDICE

PREFAZIONE

(A cura di Norbert Lantschner)..... 11

CAPITOLO 1 - INTRODUZIONE ALLA SOSTENIBILITÀ 13

- 1.1 Lo sfruttamento delle risorse fossili e lo sviluppo industriale . 13
- 1.2 Le conseguenze: il surriscaldamento del pianeta 23
- 1.3 Gli scenari dei prossimi decenni, nuove prospettive energetiche 27
- 1.4 Ridurre le emissioni gas serra 33
- 1.5 Cosa fare: le politiche europee e mondiali 37

CAPITOLO 2 - CENNI DI FISICA TECNICA E DI

TECNOLOGIA DEI MATERIALI 39

- 2.1 Come si trasmette il calore 39
 - 2.1.1 Conduzione 39
 - 2.1.2 Convezione 40
 - 2.1.3 Irraggiamento 41
 - 2.1.4 Trasmissione del calore attraverso l'involucro edilizio . 41
- 2.2 Conduttività termica dei materiali 42
 - 2.2.1 Conduttività termica equivalente dei materiali non omogenei 45
 - 2.2.2 Conduttività termica dichiarata e di progetto 45
- 2.3 Resistenza termica R delle strutture 48
 - 2.3.1 Resistenza termica totale R_T di strutture a strati omogenei 49
 - 2.3.2 Resistenza termica totale R_T di strutture a strati sia omogenei che disomogenei 51
 - 2.3.3 Esempio di calcolo di R_T di una struttura con strati sia omogenei che disomogenei 53
 - 2.3.3.1 *Calcolo del limite superiore R'_T della resistenza termica totale* 55
 - 2.3.3.2 *Calcolo del limite inferiore R''_T della resistenza termica totale* 56
 - 2.3.4 Utilizzo di strumenti di calcolo della resistenza termica totale R_T delle strutture 57
- 2.4 Trasmittanza termica U delle strutture 58
 - 2.4.1 Sulla norma UNI EN ISO 6946:2008 59
- 2.5 Flusso di calore attraverso le strutture 61
 - 2.5.1 Distinzione potenza ed energia 63
 - 2.5.2 Andamento della temperatura all'interno delle strutture multistrato 63
- 2.6 Alcune applicazioni pratiche della relazione $R = s/\lambda$ 69
 - 2.6.1 Determinazione di valori di conduttività termica equivalente λ_{equ} 69
 - 2.6.2 Determinazione di λ_{max} essendo dati spessore s e R_{lim} da raggiungere 70

2.6.3	Determinazione dello spessore s essendo dati il λ del materiale e R_{lim} da raggiungere	72
2.7	Capacità termica specifica dei materiali	72
2.7.1	Diffusività termica dei materiali	73
2.7.2	Comportamento estivo delle strutture	73
2.8	Umidità dell'aria	74
2.8.1	Grandezze fisiche riguardanti l'umidità dell'aria	75
2.9	Meccanismi di trasmissione del vapore acqueo	82
2.9.1	Convezione	82
2.9.2	Diffusione	83
2.9.3	Capillarità	83
2.9.4	Analogie fra trasmissione del calore e trasmissione del vapore	84
2.9.5	Diffusione del vapore attraverso le strutture multistrato..	84
2.9.6	È possibile smaltire l'umidità solo con la diffusione attraverso l'involucro?	88
2.9.7	Smaltimento dell'umidità con la ventilazione	89
2.10	Verifica delle strutture in presenza di vapore	91
2.10.1	Verifica delle strutture alla formazione di condensa superficiale e muffa	92
2.10.2	Verifica delle strutture alla formazione di condensa interstiziale	94
2.11	Materiali coibenti	96
2.11.1	Materiali di origine minerale	97
2.11.1.1	<i>Argilla espansa (LWA)</i>	97
2.11.1.2	<i>Perlite espansa (EP, EPB)</i>	97
2.11.1.3	<i>Vermiculite espansa (EV)</i>	97
2.11.1.4	<i>Pomice naturale</i>	98
2.11.1.5	<i>Calce-cemento Cellulare (Schiuma minerale)</i>	98
2.11.1.6	<i>Calcio silicato (CS)</i>	98
2.11.1.7	<i>Lana di roccia (MW)</i>	99
2.11.1.8	<i>Lana di vetro (MW)</i>	99
2.11.1.9	<i>Vetro cellulare (CG)</i>	99
2.11.2	Materiali di origine animale	100
2.11.2.1	<i>Lana di pecora</i>	100
2.11.2.2	<i>Piume animali</i>	100
2.11.3	Materiali di origine vegetale	101
2.11.3.1	<i>Canna palustre</i>	101
2.11.3.2	<i>Fibra di Typha Latifolia (Stiancia)</i>	101
2.11.3.3	<i>Paglia</i>	101
2.11.3.4	<i>Fieno (graminacee)</i>	102
2.11.3.5	<i>Fibra di canapa</i>	102
2.11.3.6	<i>Fibra di kenaf</i>	102
2.11.3.7	<i>Fibra di cotone</i>	103
2.11.3.8	<i>Fibra di cocco</i>	103
2.11.3.9	<i>Fibra di lino</i>	103

2.11.3.10	Fibra di mais	104
2.11.3.11	Fibra di cellulosa	104
2.11.3.12	Fibra di legno (WF)	105
2.11.3.13	Lana di legno mineralizzata (WW)	105
2.11.3.14	Sughero (ICB)	105
2.11.4	Materiali di origine sintetica	106
2.11.4.1	Polistirene espanso (EPS)	106
2.11.4.2	Polistirene espanso estruso (XPS)	106
2.11.4.3	Poliuretano (PUR) e poliisocianurato (PIR) espanso	107
2.11.4.4	Resine fenoliche espanse (PF)	107
2.11.4.5	Fibra di Poliestere (PET)	108
2.11.4.6	Pannelli sottovuoto (VIP)	108
2.11.4.7	Isolanti sottili riflettenti	108
2.11.4.8	Aerogel	109
2.11.5	Dati fisici ed ambientali dei materiali coibenti	110
CAPITOLO 3 - LE DISPERSIONI DI ENERGIA		113
3.1	Il bilancio energetico	113
3.1.1	Scambio termico totale attraverso l'involucro	118
3.1.1.1	Scambio termico totale per trasmissione	120
3.1.1.2	Scambio termico totale per ventilazione	128
3.1.2	Apporti termici totali	129
3.1.2.1	Apporti termici interni globali	131
3.1.2.2	Apporti termici solari	133
3.2	Strategie progettuali per minimizzare il bilancio termico	135
3.2.1	Strategie per il periodo invernale	135
3.2.1.1	Minimizzare lo scambio termico invernale $Q_{H,ht}$..	135
3.2.1.2	Massimizzare gli apporti gratuiti $Q_{H,gn}$	143
3.2.2	Strategie per il periodo estivo	146
3.2.2.1	Minimizzare gli apporti globali $Q_{C,gn}$	146
3.2.2.2	Massimizzare lo scambio termico totale $Q_{C,ht}$..	148
CAPITOLO 4 - UN BUON INVOLUCRO EDILIZIO		151
4.1	Importanza del rapporto di forma	151
4.2	Scegliere correttamente posizione e orientamento	154
4.3	La regola del pennarello nella definizione dell'involucro isolato e della tenuta all'aria	159
4.4	Tipi di costruzione: massiccia e leggera	161
4.5	Le fondazioni e i vani interrati	163
4.5.1	L'isolamento perimetrale	164
4.5.2	Isolamento orizzontale sottofondazione	165
4.5.3	Isolamento di travi continue e plinti	166
4.5.4	Isolamento della platea	167
4.6	Il tipo di struttura, cenni generali	169
4.6.1	Telaio con tamponamento	169

4.6.1.1	Struttura a telaio con tamponamento a cassa vuota in laterizio	170
4.6.1.2	Struttura a telaio con paramento unico in laterizio	172
4.6.1.3	Struttura a telaio con paramento unico in calcestruzzo cellulare autoclavato	173
4.6.1.4	Struttura a telaio con pannelli prefabbricati in calcestruzzo armato	174
4.6.2	Muratura portante	175
4.6.2.1	Muratura in laterizio alleggerito in pasta e rettificato	176
4.6.2.2	Muratura in calcestruzzo cellulare autoclavato	178
4.6.3	Setti portanti	180
4.6.4	La tecnologia X-Lam	181
4.7	Il sistema serramento, cenni generali	189
4.7.1	Il contro-telaio o falso telaio	191
4.7.2	Il telaio	192
4.7.2.1	Telai metallici	193
4.7.2.2	Telai in PVC	194
4.7.2.3	Telai in legno	195
4.7.2.4	Telai misti	195
4.7.3	Il vetro	196
4.7.3.1	Vetro semplice in lastra unica non trattata	196
4.7.3.2	Vetri isolanti, vetro camera	197
4.7.3.3	Vetri isolanti basso emissivi e selettivi: 2 lastre, 1 camera	197
4.7.3.4	Vetri isolanti basso emissivi: 3 lastre, 2 camere	200
4.7.3.5	Vetri "Heat mirror"	201
4.7.3.6	Vetri sottovuoto (fase di ricerca)	202
4.7.3.7	Vetrature isolanti a luce diffusa	203
4.7.4	Il distanziale	204
4.7.5	I pannelli opachi	205
4.7.6	Determinazione del valore di trasmittanza termica U_w del serramento	206
4.7.6.1	Esempio di calcolo di trasmittanza termica U_w di finestra a 1 anta	208
4.7.6.2	Il valore U_f del telaio	208
4.7.6.3	Il valore U_g del vetro	209
4.7.6.4	Il valore U_p dei pannelli opachi	210
4.7.6.5	Il valore Ψ_g del giunto telaio/vetro/distanziatore	210
4.7.6.6	Il valore Ψ_{ins} di installazione del serramento sulla parete	210
4.7.7	Sistemi di oscuramento e ombreggiamento	210
4.7.7.1	Schermature interne	211
4.7.7.2	Schermature esterne	211
4.7.7.3	Schermature integrate	213

4.7.7.4	<i>Schermature naturali</i>	213
4.7.8	La corretta posa in opera	214
4.7.8.1	<i>Posizioni di installazione</i>	214
4.7.8.2	<i>Giunto di posa</i>	217
4.7.8.3	<i>Materiali di posa</i>	218
4.7.9	Marcatura CE dei serramenti	219
4.7.10	Bibliografia e norme tecniche	220
4.8	Il tetto, cenni generali	221
4.8.1	Coperture in calcestruzzo armato e latero-cementizie .	224
4.8.2	Copertura in legno	227
4.8.3	Il tetto piano	230
4.8.4	Tetto verde	234
4.8.5	Teli, membrane e accessori	237
4.9	La protezione dal freddo	238
4.9.1	Sistema "a cappotto"	238
4.9.1.1	<i>Incollaggio</i>	243
4.9.1.2	<i>Posa delle lastre</i>	244
4.9.1.3	<i>Tassellatura delle lastre</i>	245
4.9.1.4	<i>Intonaco di fondo</i>	247
4.9.1.5	<i>Intonaco di finitura</i>	248
4.9.2	Isolamento in intercapedine	250
4.9.3	Isolamento interno	252
4.10	I dettagli costruttivi	262
CAPITOLO 5 - L'ACUSTICA NELLE COSTRUZIONI		263
5.1	Cenni di acustica in relazione all'efficienza energetica	263
5.1.1	Isolamento della facciata	267
5.1.2	Isolamento tra muri divisorii	268
CAPITOLO 6 - CENNI DI IMPIANTISTICA PER L'EFFICIENZA ENERGETICA		273
6.1	Generalità	273
6.2	Impianti di produzione del calore	275
6.2.1	Sistemi con assenza di combustione (pompa di calore, geotermia)	275
6.2.1.1	<i>Macchine termiche e primo principio della termodinamica</i>	275
6.2.1.2	<i>Ciclo frigorifero e secondo principio della termodinamica</i>	276
6.2.1.3	<i>Le pompe di calore</i>	277
6.2.2	Sistemi a combustione (caldaie a gas e gasolio, impianti a biomassa)	282
6.2.2.1	<i>Caldaia a condensazione</i>	282
6.2.2.2	<i>Biomassa legnosa</i>	284
6.2.2.3	<i>Caldaia a legname a pezzi</i>	285
6.2.2.4	<i>Caldaia a legname sminuzzato o cippato</i>	286
6.2.2.5	<i>Caldaia a pellet</i>	286

6.2.2.6	<i>Impianti solari termici combinati</i>	287
6.3	Impianti fotovoltaici	289
6.4	Ventilazione meccanica controllata	290
6.4.1	Premesse	290
6.4.2	La ventilazione meccanica controllata (VMC).....	291
6.5	Terminali di distribuzione	298
6.5.1	Sistemi idronici	298
6.5.1.1	<i>Radiatori</i>	298
6.5.1.2	<i>Ventilconvettori</i>	299
6.5.1.3	<i>Pavimenti e pannelli radianti</i>	300
6.5.1.4	<i>Sistemi di regolazione</i>	304
6.6	Impianti ibridi	304
6.7	L'automazione integrale degli edifici: domotica e progettazione integrale	306
CAPITOLO 7 - STAR BENE NEGLI AMBIENTI CHIUSI		309
7.1	Salute	309
7.1.1	La salubrità all'interno degli ambienti domestici	309
7.1.2	Elettrosmog	310
7.1.3	Gas Radon	312
7.2.	Comfort indoor	315
7.2.1	Comfort termoigrometrico	316
7.2.1.1	<i>Pressione parziale del vapore acqueo p_a</i>	328
7.2.1.2	<i>Velocità dell'aria v_{ar}</i>	329
7.2.1.3	<i>Altri modelli per il comfort termoigrometrico</i>	330
7.2.2	Comfort luminoso-visivo	331
7.2.2.1	<i>Illuminamento</i>	332
7.2.2.2	<i>Fattore medio di luce diurna</i>	333
7.2.2.3	<i>Legislazione e normativa italiana in merito all'illuminamento naturale</i>	337
7.2.2.4	<i>Alcuni accorgimenti per aumentare il valore di FLD_m</i>	339
7.2.3	Comfort acustico	346
7.2.3.1	<i>Legislazione acustica</i>	347
7.2.3.2	<i>Possibili conflitti fra criteri di contenimento energetico e requisiti acustici</i>	351
7.2.3.3	<i>Commenti sulla legislazione acustica</i>	352
7.2.4	Bibliografia e normativa tecnica	353
CAPITOLO 8 - LA COMPOSIZIONE ARCHITETTONICA		355
8.1	Chiarire qualche concetto	355
8.1.1	Architettura e sostenibilità	355
8.1.2	Architettura e ecologia	357
8.2	Progettare l'efficienza energetica senza rinunciare al disegno architettonico	360
BIBLIOGRAFIA		364

Riccardo Casaburi nasce ad Ivrea il 15 gennaio 1975, si laurea in ingegneria gestionale con specializzazione energetica al Politecnico di Torino nel 2002. Inizia la professione come tecnico commerciale, settore Europa, di una importante Società dell'ambito automotive passando poi al settore energetico con successivi avanzamenti di carriera in varie Aziende sino a ricoprire il ruolo di Direttore generale della Società AEG Reti Distribuzione di Ivrea. Nel 2013 fonda una propria Società di consulenza sempre in ambito energetico con la quale collabora con Enti pubblici per lo sviluppo di reti di teleriscaldamento e impianti cogenerativi. Ha conseguito una formazione specialistica nella direzione di Società cooperative e nell'ambito dell'efficienza energetica in edilizia presso l'Agenzia CasaClima di Bolzano. È presidente della Società ClimAbita Service Srl di Milano che opera nel settore dei servizi e del management nell'ambito della formazione.

Fabrizio Prato nasce a Torino il 1° luglio 1967, si laurea in architettura presso il Politecnico di Torino nel 1996. Nel 1999 insieme all'architetto Mario Macchiorlatti Dalmas fonda lo studio *mparchitetti* dedicandosi alla progettazione soprattutto in ambito residenziale e ad una intensa attività concorsuale nazionale e internazionale. La passione per l'efficienza energetica e la sostenibilità ambientale in architettura lo portano prima a seguire i corsi di specializzazione presso l'Agenzia CasaClima di Bolzano fino a conseguire nel 2009 il titolo di consulente esperto e, dal 2012, a collaborare attivamente con la Fondazione ClimAbita creata da Norbert Lantschner quale relatore e docente nei corsi Supervisor e nei corsi sull'analisi dei ponti termici con il software *Therm*. È attualmente coordinatore della commissione e *ClimAbita*.

Dario Vineis nasce a Torino il 20 ottobre 1963, si laurea in architettura al Politecnico di Torino nel 1989. Inizia prestissimo la libera professione fondando nel 1991 lo Studio associato "*Archimede*" e la Società di servizi "*Area s.a.s.*", impegnandosi con queste sino al 1996 in progettazioni edilizie e consulenze alle Imprese di costruzioni nell'area nord ovest del Piemonte e in Valle d'Aosta. Successivamente sviluppa la propria attività nell'ambito della progettazione ospedaliera, sociosanitaria e residenziale acquisendo gradualmente competenze nel settore dell'efficienza energetica presso l'Agenzia CasaClima di Bolzano sino al livello di consulente esperto e presso l'Istituto ZEPHIR-Passivhaus di Trento. Attualmente si occupa della progettazione di edifici a basso consumo energetico con destinazione residenziale, scolastica e ricettiva, affiancando all'attività professionale quella di relatore e pubblicita per conto della Fondazione ClimAbita di Bolzano diretta da Norbert Lantschner, della quale è vicepresidente.

L'arch. Dario Vineis è autore dei capitoli 1, 5 e 8 nonché dei paragrafi da 4.1 a 4.6, 4.8, 4.9 e 7.1. L'arch. Fabrizio Prato è autore dei capitoli 2 e 3 nonché dei paragrafi 4.7 e 7.2. L'ing. Riccardo Casaburi è autore del capitolo 6. Gli autori rivendicano i diritti riservati su tutte le illustrazioni da loro realizzate.

PREFAZIONE

“Non basta volere, occorre anche agire”. Con questo intento il 14 giugno 2012 nasce la *Fondazione ClimAbita*, grazie all’impegno di persone da sempre sensibili ai temi della sostenibilità e del rispetto per l’ambiente e che, attraverso le proprie attività professionali ed istituzionali, hanno attuato azioni indirizzate alla salvaguardia del territorio a beneficio delle future generazioni. La Fondazione ClimAbita non ha fini di lucro e la sua missione è sviluppare e promuovere una nuova cultura del vivere e del costruire sostenibile per il bene della collettività, promuovendo ogni azione realisticamente possibile per contrastare gli effetti negativi del cambiamento climatico che attanaglia il nostro pianeta.

La Fondazione, in virtù delle competenze possedute e delle professionalità che aderiscono al suo progetto, assume un ruolo di partner per professionisti, amministrazioni pubbliche, aziende e verso il mondo della scuola, per favorire la realizzazione di strategie nell’ambito dell’efficienza energetica, dell’utilizzo delle risorse, dell’impiego dei materiali e dei processi di riciclo e recupero, con l’obiettivo primario di un corretto rapporto fra uomo e natura.

Con questo spirito e con la consapevolezza dell’importante ruolo che il comparto edilizio assume in seno alla riduzione delle emissioni climalteranti, ecco che la Fondazione presenta oggi il suo primo manuale per la costruzione di edifici energeticamente efficienti. Questo lavoro si pone quale strumento di indirizzo per i progettisti che hanno interessi nell’ambito della progettazione della sostenibilità, con la trattazione di argomenti che troveranno adeguati approfondimenti specifici in altre pubblicazioni successive.

Lo scopo di questo manuale è pertanto fornire al giovane progettista, come pure a quello dotato di esperienza, elementi tecnici concreti e di principio su cui basare la propria attività quando si trova nella condizione di progettare un edificio; spesso, infatti, il compito imposto alla progettazione trascura il tema dell’efficienza energetica, relegando a questa il ruolo di mera verifica degli adempimenti normativi. È auspicabile invece che colui che si occupa di ideare le forme e dare sostanza al progetto edilizio abbia innanzitutto ben chiaro il principio secondo cui gli edifici non debbano consumare energia: buon isolamento, nessuna dispersione, apporti energetici solari. Questo manuale offre in modo esaustivo una guida.

La collaborazione con Legislazione Tecnica in quest’ambito disciplinare è un’importante traguardo per la Fondazione ClimAbita in quanto l’esperienza dell’editore, lunga più di ottant’anni a servizio del mondo delle professioni,

rappresenta una solida garanzia di competenza e di rigore nella divulgazione dei contenuti tecnici e scientifici.

Ringrazio tutti gli amici, professionisti e non, che con dedizione e costanza hanno sino ad oggi dato supporto alla Fondazione con idee e con conoscenze utili alla maggiore diffusione dei saperi e della missione in cui si crede; in particolare ringrazio il vicepresidente ed il coordinatore della commissione e *ClimAbita* per il loro instancabile lavoro.

Ringrazio tutti coloro che hanno creduto in questo libro e che ad esso hanno dedicato molti mesi di duro lavoro, primo fra tutti l'editore che non si è fatto intimorire dalla complessità dell'operazione editoriale di pubblicazione di un manuale che oggi, nel mondo del web, sembrerebbe, a torto, anacronistica.

Ci auguriamo di poter contribuire in maniera sempre maggiore alla divulgazione delle conoscenze, forti della consapevolezza che solo una maggiore cultura riuscirà a migliorare il mondo in cui viviamo.

Norbert Lantschner,
Presidente della Fondazione ClimAbita



**Pagine non disponibili
in anteprima**



2.9.4 Analogie fra trasmissione del calore e trasmissione del vapore

Esistono una serie di analogie fra il passaggio di calore e il passaggio di vapore per diffusione attraverso le strutture multistrato.

Come il passaggio di calore è causato da una differenza di temperatura fra la superfici interne ed esterne delle strutture che compongono l'involucro edilizio, così il passaggio del vapore per diffusione è causato da una differenza di pressione di vapore. La direzione va in entrambi i casi da ambiente con aria calda, cui corrispondono pressioni di vapore alte, ad ambiente con aria fredda, cui corrispondono pressioni di vapore minori. Questo avviene principalmente da ambienti interni ad ambienti esterni in inverno e, al contrario, dall'esterno all'interno in estate.

Come esiste una grandezza fisica che quantifica la capacità delle strutture di resistere al passaggio del calore in funzione delle differenza di temperatura, resistenza termica totale, così esiste un'analogia grandezza fisica che quantifica la capacità delle strutture a resistere al passaggio del vapore in funzione della differenza di pressione di vapore, resistenza alla trasmissione del vapore.

Come la *resistenza termica totale multistrato* è data dalla somma delle resistenze termiche dei singoli strati e delle resistenze superficiali, così la *resistenza totale alla trasmissione del vapore* è data dalla somma delle resistenza alla trasmissione del vapore dei singoli strati e delle resistenze superficiali.

2.9.5 Diffusione del vapore attraverso le strutture multistrato

La caratteristica fisica propria dei materiali omogenei che permette di misurare la diffusione del vapore è la *permeabilità al vapore*, indicata dalla lettera greca delta minuscola (δ_p), che rappresenta la quantità di vapore acqueo che uno strato del materiale di 1 metro di spessore lascia passare nell'unità di tempo quando la differenza di pressione del vapore fra le due facce è di un Pascal (Pa), si misura in kg/msPa.

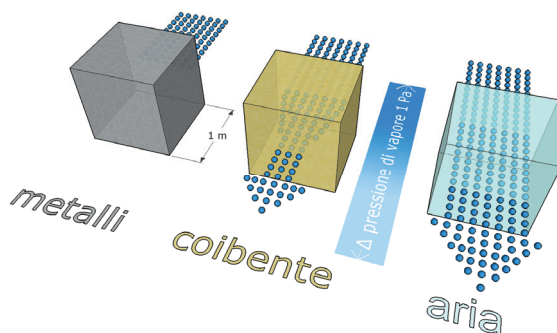


Figura 2.33 - Permeabilità al vapore dei materiali

Come per la conduttività termica dei materiali anche la permeabilità al vapore dipende dalla temperatura e dall'umidità relativa a cui si effettuano le prove per determinarla. Per questo motivo sono solitamente forniti valori di permeabilità al vapore in campo asciutto, δ_a , determinati a 23 °C con umidità relativa compresa fra 0% e 50%, e valori di permeabilità al vapore in campo umido, δ_u , determinati a 23 °C con umidità relativa compresa tra 50% e 95%. Dei materiali eterogenei e dei prodotti edilizi compositi vengono forniti valori di permeabilità equivalenti.

La norma tecnica di riferimento sulle condizioni standard di misura della permeabilità al vapore dei materiali è la UNI EN ISO 12572:2006.

Dei materiali omogenei viene determinato il fattore di resistenza al vapore, indicato con la lettera greca μ (mu), grandezza adimensionale data dal rapporto fra la permeabilità al vapore dell'aria in quiete a 293 K, $\delta_0 = 200 \cdot 10^{-12}$ kg/msPa, e la permeabilità al vapore del materiale:

$$\mu_{\text{materiale}} = \delta_0 / \delta_p$$

Ne consegue che l'aria ha fattore di resistenza al vapore $\mu = 1$.

Per esempio, la permeabilità al vapore del calcestruzzo cellulare autoclavato (AAC) è $\delta = 38 \cdot 10^{-12}$ kg/msPa, il suo fattore di resistenza al vapore è:

$$\mu_{\text{materiale}} = \delta_0 / \delta_p = 200 / 38 = 5,26$$

Cioè il calcestruzzo cellulare autoclavato oppone una resistenza al passaggio del vapore cinque volte superiore a quella dell'aria.

Più grande è μ maggiore è la resistenza al passaggio del vapore offerta dal materiale.

Alcuni materiali, come i metalli, hanno $\mu = \text{infinito}$ il che significa che impediscono completamente il passaggio del vapore.

Dei materiali eterogenei e dei prodotti edilizi compositi viene solitamente determinato lo spessore equivalente di aria, indicato con S_d , misurato in metri, dato da:

$$S_d = \mu \cdot s$$

Più grande è il valore S_d maggiore è la resistenza al passaggio del vapore offerta dal materiale eterogeneo o dal componente edilizio.

In base al valore di S_d un prodotto si definisce:

- aperto alla diffusione del vapore, con $S_d < 0,2$ m (guaine altamente traspiranti);

- ritardante la diffusione del vapore, con $0,2 \text{ m} < S_d < 100 \text{ m}$ (guaine freno al vapore);
- impermeabile al vapore, con $S_d > 100 \text{ m}$ (barriera al vapore).

La quantità di vapore acqueo che attraversa per diffusione una struttura multi-strato è data dalla seguente relazione:

$$g = \delta_0 \cdot \Delta p / \Sigma S_d$$

dove:

- δ_0 è la permeabilità al vapore dell'aria, riferita alla pressione parziale di vapore, essa vale $200 \cdot 10^{-12} \text{ kg/msPa}$;
- Δp è la differenza di pressione parziale di vapore tra la superficie interna ed esterna della struttura ($p_i - p_e$), in Pa;
- ΣS_d è lo spessore totale equivalente di aria dell'intera stratigrafia, in m.

Prendiamo ancora una volta la struttura in muratura di laterizio analizzata più volte. I fattori di resistenza al passaggio del vapore dei materiali sono per l'intonaco interno $\mu = 6$, per la muratura in laterizio pieno (compresi i giunti di malta) $\mu = 10$, per l'intonaco esterno $\mu = 8$.

Le condizioni di temperatura e umidità relative interne sono:

$$T_i = 20 \text{ }^\circ\text{C}, \varphi = 65\%$$

Le condizioni di temperatura e umidità relative esterne sono:

$$T_e = 0 \text{ }^\circ\text{C}, \varphi = 90\%$$

Nel calcolo si prende in considerazione il solo vapore trasmesso per diffusione attraverso la struttura e si trascurano le resistenze al trasporto del vapore per convezione tra le superfici interna ed esterna e l'aria.

Lo spessore totale equivalente della struttura è quindi dato dalla somma dei singoli strati:

$$\Sigma S_d = \mu_1 \cdot s_1 + \mu_2 \cdot s_2 + \mu_3 \cdot s_3 = 6 \cdot 0,015 \text{ m} + 10 \cdot 0,42 \text{ m} + 8 \cdot 0,015 \text{ m} = 4,41 \text{ m}$$

La pressione parziale di vapore interna è:

$$p_i = \varphi \cdot p_{\text{sat}} = 0,65 \times 2337 \text{ Pa} = 1519 \text{ Pa}$$



**Pagine non disponibili
in anteprima**



3.2.2 Strategie per il periodo estivo

Come anticipato all'inizio del punto 3.1, per il periodo estivo è invece necessario minimizzare gli apporti globali $Q_{C,gn}$ in particolare quelli solari e massimizzare lo scambio termico totale $Q_{C,ht}$, intervenendo in particolare sulla ventilazione, e al contempo massimizzare il grado di utilizzo dello scambio termico, $\eta_{C,gn}$.

3.2.2.1 Minimizzare gli apporti globali $Q_{C,gn}$

Apporti interni

Come per il caso invernale non è possibile controllare dal punto di vista progettuale gli apporti interni dovuti alla presenza di persone o all'attività che esse vi svolgono. Nel periodo estivo tali apporti sono “*regali*” non graditi perché contribuiscono ad aumentare il fabbisogno di energia per il raffrescamento ed è necessario quindi dissiparli il più in fretta possibile.

Anche nel caso estivo non sono considerabili gratuiti né tanto meno ammissibili eventuali apporti negativi dovuti ad assorbimento di calore da parte di reti di distribuzione del freddo mal coibentate perché indice di inefficienza dell'impianto di raffrescamento.

Apporti solari

Per minimizzare gli apporti solari estivi è necessario prevedere in fase di progettazione adeguati ombreggiamenti delle strutture opache e, soprattutto, di quelle trasparenti.

Strutture opache

Le principali scelte progettuali che permettono di ridurre gli apporti termici estivi attraverso le strutture opache sono:

- l'utilizzo di colori chiari per le superfici esterne, caratterizzate da un basso indice di assorbimento solare, sistema in uso tutt'ora nell'architettura, anche povera, dei paesi caldi;
- facciate e coperture ventilate, dotate cioè di un'intercapedine esterna fortemente ventilata che aiuti a smaltire per convezione, soprattutto nelle ore notturne, il calore accumulato durante il giorno;
- tetti verdi, che permettono di smorzare enormemente la radiazione termica incidente e ridurre gli effetti indesiderati;
- prevedere ombreggiamenti esterni anche per le strutture opache con piante o quinte vegetali stagionali.

Dal punto di vista del comfort interno è inoltre importante che le strutture siano caratterizzate da alti valori di sfasamento e smorzamento, capaci cioè di ritardare di almeno 10-12 ore l'onda termica dall'esterno verso l'interno e di farla giungere con intensità decisamente minore. Per raggiungere tali comportamenti è importante che la struttura sia molto ben coibentata, in particolare sul lato esterno, possibilmente con materiale coibente di alta capacità termica specifica e che essa stessa sia massiccia e realizzata, almeno sullo strato più interno, con materiali di alta capacità termica specifica, come per il caso invernale.

Strutture trasparenti

Anche strutture opache con ottimi valori di sfasamento e smorzamento non possono però niente contro il surriscaldamento dovuto all'ingresso del sole da finestre non opportunamente schermate. I sistemi di schermatura solare, sia di tipo fisso o mobile, devono sempre essere esterni al vetro per essere realmente efficaci e impedire completamente alla radiazione solare incidente sia di attraversare la parte vetrata che di colpire le parti del telaio. Una volta che il sole ha attraversato il vetro il danno è fatto.

Le finestre rivolte a sud possono essere efficacemente ombreggiate con sporti fissi, dimensionati in modo tale da non permettere alla radiazione solare di penetrare attraverso le finestre nelle ore centrali della giornata estiva, quando il sole è alto sull'orizzonte, ma che la lascino entrare d'inverno quando il sole è più basso sull'orizzonte. Sistema in uso sin dall'antichità, basta vedere per esempio la disposizione delle case e la conformazione delle aperture e degli sporti nella antica città greca di Priene, in Asia Minore.

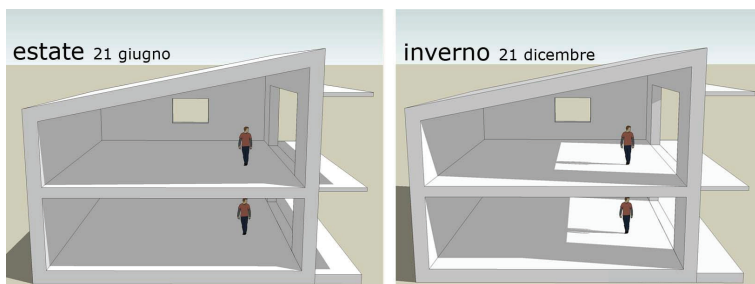


Figura 3.18 - Ombreggiamenti a sud

Le finestre rivolte a est e a ovest devono invece essere ombreggiate con schermi esterni mobili perché in estate il sole mattutino, quando è ancora basso sull'orizzonte a est, e soprattutto il sole del tardo pomeriggio, quando è basso sull'orizzonte a ovest, è molto caldo e nessuno sporto fisso, proprio per questioni geometriche, può ostacolarlo.

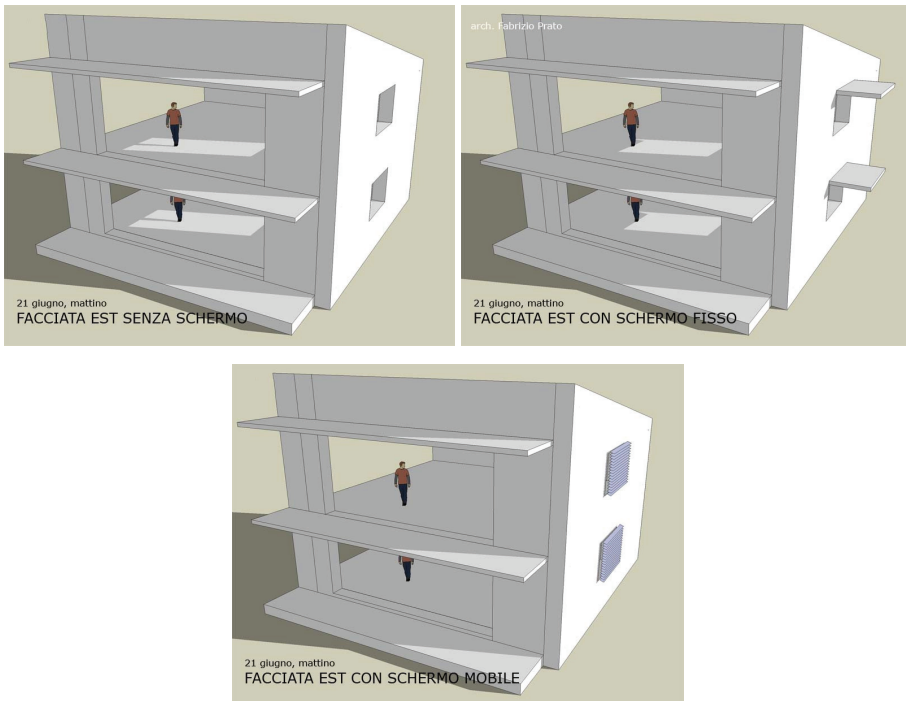


Figura 3.19 - Ombreggiamenti a est e ovest

Ancor più nel caso delle strutture trasparenti è importantissimo prevedere l'uso della vegetazione, preferibilmente a foglie caduche, come strumento naturale di ombreggiamento stagionale e di controllo del microclima locale.

3.2.2.2 *Massimizzare lo scambio termico totale $Q_{C,ht}$*

La coibentazione dell'involucro

Esattamente come per il caso invernale la coibentazione dell'involucro è essenziale per ridurre al minimo l'ingresso di calore per trasmissione attraverso le strutture, ma la differenza media di temperatura ridotta rispetto all'inverno, con temperatura di progetto interna estiva di 26 °C sono dell'ordine di 5-10 K contro i 20-25 K invernali, e questo dal punto di vista del comfort interno come abbiamo visto coinvolge fenomeni dinamici che implicano la possibilità di ritardare e smorzare l'oscillazione termica esterna nel passaggio verso l'interno delle strutture.

Ventilazione

Prima di dover accendere un impianto di raffrescamento attivo, che dal punto di vista energetico è assai più gravoso di un impianto di riscaldamento, in un edificio ad alta efficienza energetica è possibile sfruttare i benefici della ventilazione, almeno per contenere l'accumulo giornaliero di calore nelle strutture interne dell'edificio. Questo può essere fatto con l'impianto di ventilazione meccanizzata dotato del cosiddetto *by-pass notturno estivo*, cioè di un sistema di esclusione dello scambiatore di calore azionato da termostati interni ed esterni non appena la temperatura dell'aria esterna notturna scende al di sotto di quella interna.

Ancor meglio è adottare sistemi naturali passivi di ventilazione che sfruttino le brezze fresche notturne, aprendo semplicemente le finestre su facciate contrapposte e a quote diverse: anche in questo caso sono estremamente interessanti i sistemi, tipo le torri del vento, tipici dell'architettura tradizionale di paesi caldi quali Arabia, Irak, frutto di esperienza millenaria.

Fattore di utilizzazione dello scambio termico

Come il fattore di utilizzo degli apporti globali nel periodo invernale esso dipende dal rapporto tra gli apporti globali e lo scambio termico totale nel periodo di raffrescamento ($Q_{C,gn}/Q_{C,ht}$) e dall'inerzia termica dell'edificio, dalla sua costante di tempo e , in ultima analisi, dalla capacità termica interna delle strutture. Quindi anche per riuscire a dissipare il più possibile i carichi termici estivi è indispensabile avere strutture con almeno la superficie interna di materiali ad alta capacità termica: per esempio in un edificio ad altissima efficienza energetica, quindi con un grado notevole di coibentazione, l'apporto termico dovuto alla cottura della pasta potrebbe essere un problema se le superfici interne di pareti soffitti e pavimenti non fossero in grado di assorbire rapidamente il picco di calore e “nasconderlo” negli strati interni.



**Pagine non disponibili
in anteprima**



Tratteremo ora le caratteristiche tecniche che debbono possedere i vari tipi di coperture in funzione della struttura impiegata per la loro realizzazione.

4.8.1 Coperture in calcestruzzo armato e latero-cementizie

Realizzare una copertura in calcestruzzo armato significa aver scelto, per la realizzazione dell'edificio, una struttura massiccia a telaio o in muratura la cui costruzione fa parte di un insieme statico ed architettonico organico. Diciamo subito che la copertura in calcestruzzo armato può essere a soletta piena, cioè armata completamente oppure con travi e cordoli in calcestruzzo armato ed elementi laterizi (pignatte) intervallate da travetti armati. Lasciamo la scelta della tipologia edilizia alla libertà del progettista e consideriamo solamente gli aspetti di efficienza energetica che l'adozione di questo tipo di struttura implica. Innanzitutto, occorre puntualizzare che le coperture in calcestruzzo armato e quelle latero-cementizie hanno il pregio di possedere una notevole massa complessiva che le favorisce negli aspetti energetici di protezione dal caldo, essendo maggiore la loro capacità di sfasamento dell'onda termica e di attenuazione rispetto a sistemi di copertura leggeri. D'altro canto questa tecnologia costruttiva pone in essere la questione di dover risolvere l'annoso problema del ponte termico in corrispondenza delle cordolature e degli eventuali sbalzi di gronda. Infatti, le strutture in calcestruzzo armato in copertura, come pure per balconi e terrazzi, all'atto di fuoriuscire dal profilo esterno dell'edificio non interrompono la propria continuità strutturale a meno che non si utilizzino speciali apparecchiature all'uopo realizzate (disgiuntori termici); pertanto ogni elemento di solaio (rettilineo o inclinato) fuoriuscente dal filo della muratura deve essere anch'esso isolato completamente.

Risulta evidente la complessità di questa operazione che suggerisce l'opportunità di realizzare coperture in calcestruzzo armato e latero-cementizie solo entro il filo del fabbricato e quindi senza aggetti, sporti e cornicioni di alcun genere, ciò per poter garantire la continuità dell'isolamento secondo la consueta *“regola del pennarello”*.

Il corretto isolamento della copertura avviene predisponendo una listellatura *“a perdere”* direttamente poggiata sugli elementi di laterizio, nel senso longitudinale della pendenza, prima di eseguire il getto di collaborazione, essa verrà compresa nel getto stesso⁽¹⁸⁾; questa listellatura dovrà essere spessa quanto lo strato collaborante in calcestruzzo ed apparire in vista al momento del disarmo; servirà per il fissaggio della seconda orditura di listelli entro i quali inserire con leggera

⁽¹⁸⁾ La corretta disposizione dei travetti, nel caso di esecuzione di un solaio latero-cementizio, è nel senso longitudinale della pendenza in quanto con questa configurazione viene garantito che il calcestruzzo possa assorbire gli sforzi di compressione.

pressione i pannelli isolanti che dovranno essere perfettamente aderenti ai listelli, senza spazi e fessure. Se i pannelli isolanti utilizzati hanno una massa volumica adeguata a sopportare gli sforzi di compressione senza subire deformazioni, si potrà scegliere di non apporre la seconda listellatura.

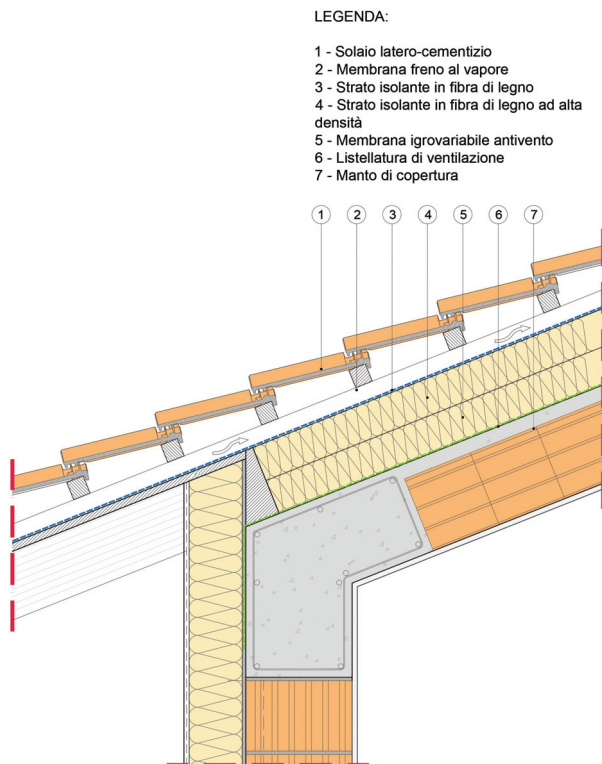


Figura 4.46 - Copertura latero-cementizia in pendenza con sporto

Anche con le strutture latero-cementizie è possibile realizzare parti aggettanti che riparino la struttura muraria sottostante adottando sovrastrutture con passafuori lignei ancorati alla listellatura preventivamente annegata nel getto o direttamente alle cordolature di bordo mediante tassellatura. In tale caso la parte aggettante dei passafuori dovrà essere completata con un tavolato ligneo di finitura allineato con l'ultimo strato di coibentazione.

Completato lo strato isolante si procederà disponendo il telo traspirante antivento e di protezione dalle infiltrazioni accidentali di acqua, avendo cura di nastrare perfettamente le giunzioni tra telo e telo ed intorno agli elementi fissi che eventualmente lo attraversano. In assenza di passafuori questo telo dovrà essere risvoltato per circa 50 cm sulla superficie verticale del muro ed incollato, mentre

nel caso di passafuori dovrà essere esteso sino all'estremità del tavolato e quindi ivi incollato con nastro continuo.

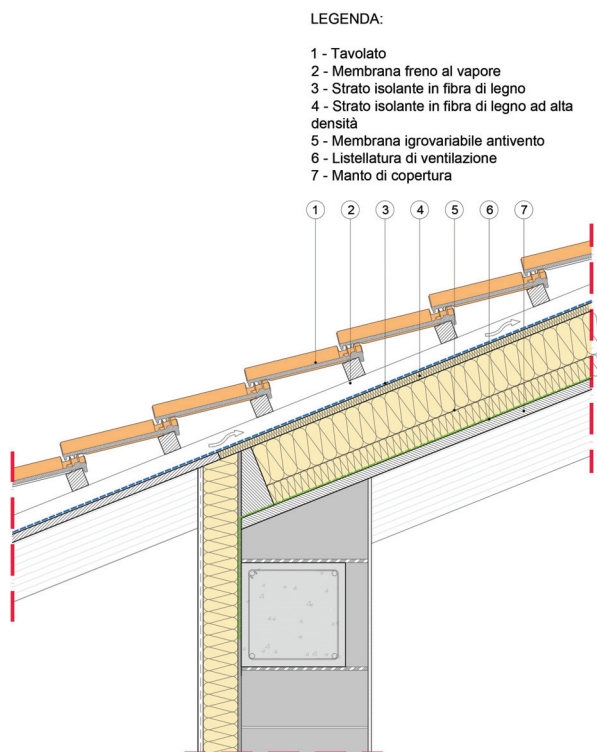


Figura 4.47 - Copertura a orditura lignea con sporto

Come quasi tutte le coperture anche quelle realizzate con struttura in calcestruzzo armato o latero-cementizia necessita di uno strato di ventilazione tra l'isolante ed il manto impermeabile vero e proprio; l'utilità di questo strato risiede nella necessità di smaltire il vapore acqueo che transita per diffusione attraverso gli strati, dall'interno verso l'esterno e che deve essere rimosso subito dopo lo strato isolante al fine di non generare fenomeni di condensazione interstiziale che danneggerebbero il materiale isolante con compromissione della capacità isolante. L'altezza utile di questo strato di ventilazione deve essere realizzata in funzione della pendenza della copertura per garantire una adeguata velocità dell'aria: minore sarà la pendenza, maggiore sarà l'altezza dello strato di ventilazione e viceversa. Analogamente tanto vale anche per la fessura di ingresso dell'aria e per il camino di ventilazione da realizzare sulla sommità della copertura nel modo più consono al tipo di manto di copertura scelto.

È buona norma adottare i valori dimensionali riportati nelle Tabelle 4.1 e 4.2 ⁽¹⁹⁾.

Tabella 4.1 - Ventilazione con camino sul colmo fino a 15 m di lunghezza falda

Pendenza della copertura	Altezza dell'intercapedine	Larghezza della fessura di ingresso dell'aria
$3^\circ \leq P \leq 15^\circ$ $5\% \leq P \leq 27\%$	8 cm	≥ 4 cm
$P > 15^\circ$ $P > 27\%$	4 cm	≥ 3 cm
Facciata 90°	2 cm	≥ 2 cm

Tabella 4.2 - Ventilazione trasversale senza camino fino a 30 m di larghezza falda

Pendenza della copertura	Altezza dell'intercapedine	Larghezza della fessura di ingresso dell'aria
$3^\circ \leq P \leq 10^\circ$ $5\% \leq P \leq 18\%$	10 cm	≥ 6 cm

La listellatura di ventilazione applicata al di sopra del telo traspirante e antivento deve essere fissata con viti adeguate avendo cura di frapporre, tra il telo ed il listello, nel punto ove passa la vite, un nastro butilico con funzione di guarnizione di tenuta all'aria.

Oltre la listellatura di ventilazione vi è solo il manto impermeabile che può essere realizzato con materiali diversi a seconda delle necessità e delle scelte progettuali; nei casi di manti in laterizio (coppi, tegole) occorrerà realizzare la corrispondente listellatura adatta alla tipologia di manto da posare in opera; nel caso invece di coperture metalliche (rame, zinco-titanio) sarà opportuno realizzare un assito sul quale disporre prima una stuoia a filamenti tridimensionali per l'attenuazione del rumore e quindi applicare lo strato metallico secondo le tecniche del caso (aggraffatura doppia, aggraffatura angolare, giunti a listello, tecnica a scaglie, ecc.).

4.8.2 Copertura in legno

La realizzazione di coperture in legno ha il pregio di un'ampia versatilità compositiva e geometrica essendo realizzate da pezzi assemblati, tuttavia occorre

⁽¹⁹⁾ Cfr. Ufficio Applicazione Tecnica Rheinzink, *Applicazioni in architettura*, II edizione, Edizioni Rheinzink, Datteln D, settembre 2003, versione italiana aprile 2005, pp. 60-61.



**Pagine non disponibili
in anteprima**



6.4.2 La ventilazione meccanica controllata (VMC)

La *ventilazione meccanica controllata (VMC)* è un sistema che consente di introdurre nell'edificio l'aria esterna con lo scopo di sostituire quella interna; questo ciclo avviene grazie ad una macchina che aspira e convoglia l'aria negli ambienti in cui è necessario ventilare (soggiorno, camere), sottraendola ai locali o alle zone ove è necessario rinnovarla (cucina, bagni): alcuni locali saranno pertanto in lieve sovrappressione ed altri in lieve depressione. È importante sottolineare che il passaggio tra ingresso ed uscita dell'aria avviene entro la macchina di ventilazione, la quale consente uno scambio termico tra i due flussi d'aria ma senza mescolanza di particelle tra questi; l'aria in uscita a temperatura ambiente cede un po' del suo calore a quella in entrata più fredda, la quale viene immessa nei locali limitando gli effetti di disomogeneità termica: il sistema è denominato "*recuperatore di calore*" ed ha rendimento che, in funzione della conducibilità e delle proprietà dei materiali impiegati ed in base alla superficie di scambio dei flussi d'aria, può superare il 90%; il recuperatore di calore non è altro che uno scambiatore aria-aria.

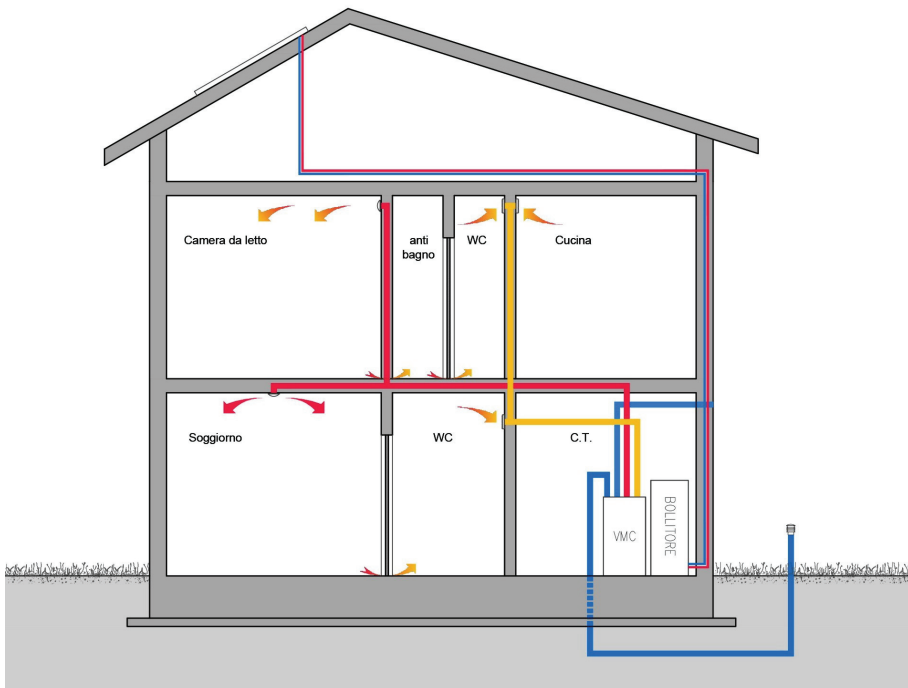


Figura 6.7- Schema dei flussi in immissione ed estrazione con VMC

La ventilazione meccanica controllata è un sistema complesso, esso è composto di molte parti che ne fanno un impianto vero e proprio il cui impiego deve rispettare alcune regole; innanzitutto devono essere previsti, in fase di progettazione edilizia, adeguati cavedi per il passaggio verticale delle tubazioni di mandata e di ripresa, accompagnando le scelte architettoniche di distribuzione funzionale degli ambienti con la previsione della rete di distribuzione. Queste accortezze preliminari consentono una migliore funzionalità dell'impianto e certamente la limitazione degli errori in cantiere, allorquando si alterneranno nel lavoro maestranze con compiti diversi. Se queste attenzioni sono pressoché consolidate nelle grandi progettazioni industriali, terziarie o ospedaliere, non sono invece così scontate nelle progettazioni di edilizia residenziale, specie se di taglio unifamiliare.

Altro aspetto importante riguarda la scelta della tipologia della macchina; in commercio ve ne sono molte con rendimenti del recuperatore di calore molto diversi, dal 30 al 95%. Talune macchine, di piccola portata, hanno la proprietà di potere essere installate direttamente all'interno dell'ambiente e di servire alla ventilazione in modo diretto, senza l'ausilio di canalizzazioni di distribuzione; esse presentano però grandi limitazioni sul piano del rendimento e della portata volumetrica, possono essere impiegate favorevolmente per piccoli ambienti e nel caso di ristrutturazioni parziali di fabbricati.

Altre macchine di maggiori dimensioni hanno necessità di essere installate in appositi locali ove trovano posto altri apparati dell'impianto come, per esempio, i motori elettrici dei ventilatori, i filtri ed i silenziatori delle tubazioni; spesso questo tipo di macchine sono dotate di coibentazione per favorire il maggior rendimento dello scambiatore termico.

Le macchine di ventilazione meccanica controllata dovrebbero essere collocate, ove possibile, in modo baricentrico rispetto all'abitazione, questo accorgimento permettere di ridurre l'estensione delle condotte di distribuzione e così facendo il miglioramento della distribuzione dell'aria. Le macchine di ventilazione possono trovare collocazione pressoché ovunque all'interno dell'abitazione perché sono molto silenziose, si sconsiglia però di posizionarle all'interno delle camere da letto o nei locali immediatamente prospicienti a queste. Se viene scelto il collocamento all'esterno od in ambienti non riscaldati è bene prevedere una copertura isolata ed ispezionabile, ad esempio un armadietto coibentato. I luoghi ideali dove posizionare la macchina di ventilazione sono la centrale termica se baricentrica e interna al perimetro del fabbricato, i ripostigli, la lavanderia ed il sottotetto. Più la macchina di ventilazione è vicina alle prese di aria esterne, minori saranno le sue perdite di carico durante l'esercizio.

Le macchine di ventilazione sono studiate e progettate per poter supportare canalizzazioni dallo sviluppo più o meno esteso; solitamente una lunghezza dei tubi ritenuta non problematica è compresa entro i 10-15 metri, distanza che può variare notevolmente in base al tipo di macchina di ventilazione scelta ed al diametro della tubazioni di distribuzione.

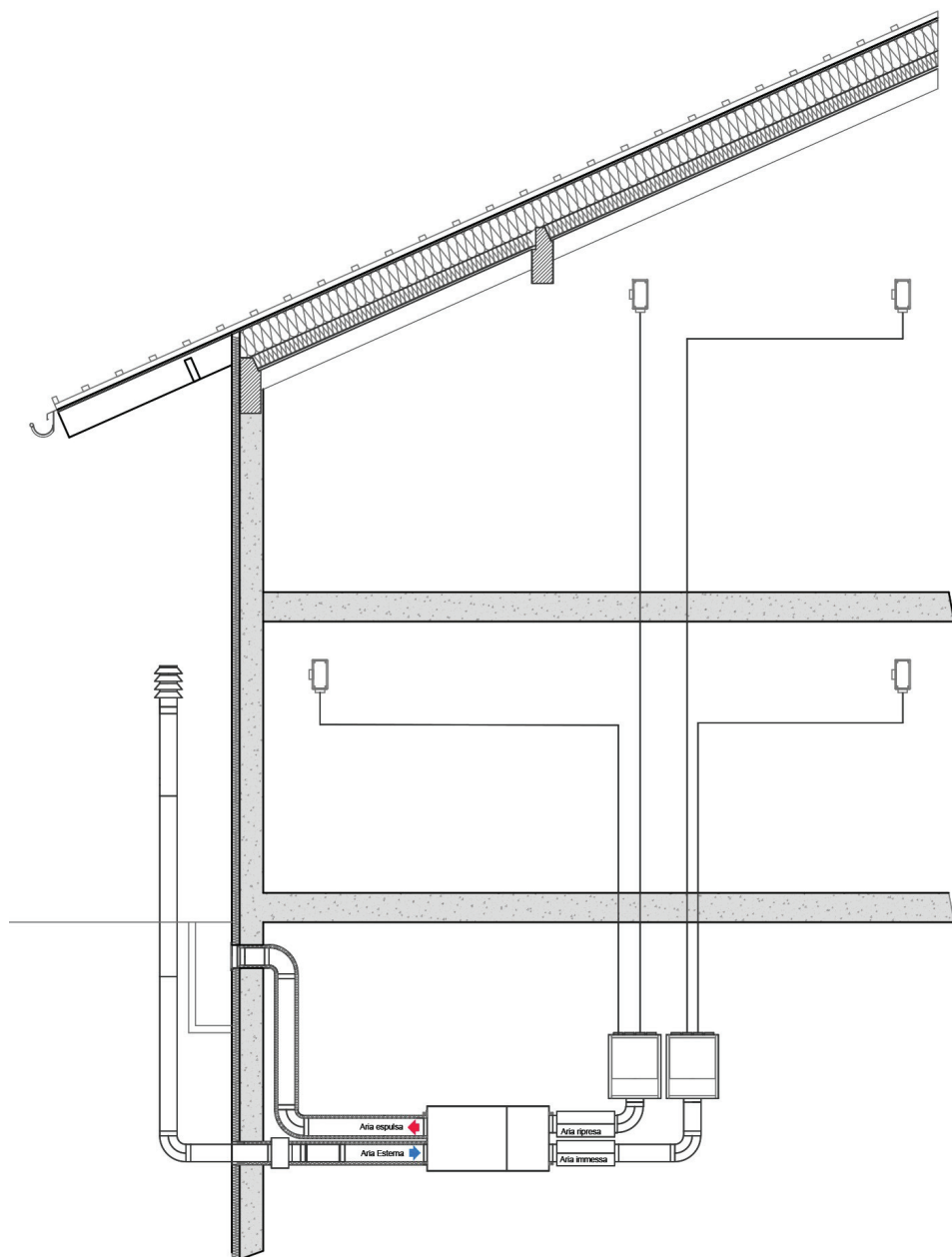


Figura 6.8 - Schema di impianto di VMC