



Teoria e tecnologia delle coperture ad elevate prestazioni

a cura di Sergio Croce



SOMMARIO

CAPITOLO 1

Il progetto dei sistemi di copertura a falda *di Sergio Croce*

1.1 Introduzione	1
1.2 Il tetto: alcuni problemi di progettazione tecnologica	2
1.3 Il tetto e le condizioni di benessere negli ambienti sottostanti	3

CAPITOLO 2

Il sistema copertura *di Tiziana Poli*

2.1 Requisiti caratteristici delle chiusure orizzontali superiori	8
2.2 Tipologie e modelli funzionali delle chiusure orizzontali superiori	10

CAPITOLO 3

Cenni di progettazione del sistema strutturale delle coperture a falda *di Matteo Fiori*

3.1 Concetti strutturali generali	15
3.1.1 Valori resistenze di calcolo	16
3.2 Tipologie e materiali utilizzati	17
3.2.1 Resistenza agli organismi biologici	17
3.3 Indicazioni per il predimensionamento	19

CAPITOLO 4

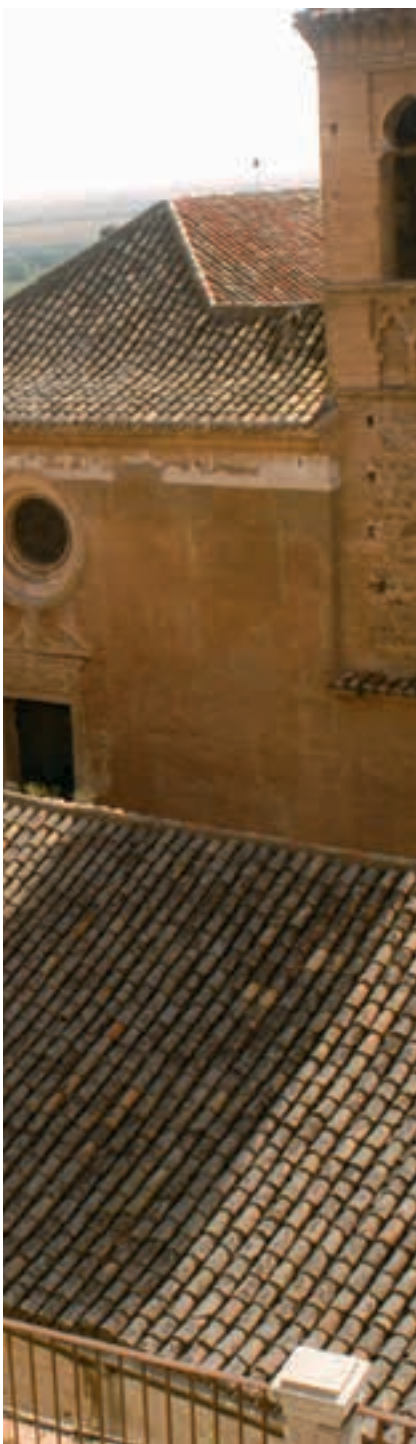
Comportamento termico: aspetti di teoria e progettazione *di Giorgio Pansa e Andrea Mainini*

4.1 Comportamento nella stagione invernale	21
4.1.1 Il calcolo della trasmittanza	21
4.2 Comportamento nella stagione estiva	23
4.2.1 L'inerzia della chiusura	23
4.2.2 L'inerzia dell'ambiente	25
4.3 Effetti della ventilazione	26
4.3.1 Il funzionamento delle coperture ventilate: asportazione dei carichi termici	27
4.3.2 Regole di buona progettazione	28

CAPITOLO 5

Fenomeni condensativi: aspetti di teoria e progettazione *di Riccardo Paolini*

5.1 Condensazione interstiziale e condensazione superficiale	29
5.2 Effetti dei fenomeni condensativi	29
5.3 Strumenti di valutazione e controllo del rischio di condensazione interstiziale e superficiale	30
5.4 Limitazioni dei metodi normati semplificati	30
5.4.1 Approssimazioni del modello e dei meccanismi di trasporto	31
5.4.2 Approssimazioni delle forzanti	31
5.4.3 Approssimazione dei dati di input sulle proprietà dei materiali	31
5.5 Spunti progettuali	31



CAPITOLO 6

Tenuta all'aria di Riccardo Paolini

6.1 Introduzione al problema: forzanti, punti critici e cause di mancanza di tenuta all'aria.	33
6.2 Conseguenze di una non efficace tenuta all'aria	33
6.3 Misura della tenuta all'aria	34
6.4 Spunti progettuali	34

CAPITOLO 7

Acustica e coperture di Enrico De Angelis

7.1 Requisiti acustici passivi e sottotetti	35
7.2 Isolamento acustico e potere fonoisolante composito.	36
7.3 I sistemi per l'isolamento ai rumori aerei.	38
Un esempio. L'isolamento acustico di un locale sotto copertura.	40

CAPITOLO 8

Protezione dagli incendi: aspetti di teoria e progettazione di Matteo Fiori

8.1 L'incendio.	43
8.1.1 Dinamica dell'incendio	43
8.1.2 Effetti dell'incendio	44
8.2 Cenni di prevenzione incendi	45
8.3 Protezione antincendio.	45
8.3.1 Resistenza al fuoco delle strutture	45
8.3.2 Reazione al fuoco dei materiali	46
8.4 Spunti progettuali	50

CAPITOLO 9

Sistemi di ancoraggio e fissaggio meccanico di Matteo Fiori

9.1 Soluzioni di copertura a falde a piccoli elementi ed elementi di collegamento.	51
9.2 Soluzioni di copertura a falde a grandi elementi ed elementi di collegamento.	52
9.3 Soluzioni di copertura continua ed elementi di collegamento	53
9.4 Esempio di calcolo di fissaggi (per punti) di una copertura piana.	53

CAPITOLO 10

Cenni sul dimensionamento dei sistemi di raccolta e allontanamento delle acque meteoriche di Matteo Fiori

10.1 Criteri generali di progettazione	55
10.2 Criteri generali di dimensionamento di canali di gronda e pluviali.	56
10.2.1 Calcolo della portata di acqua da fare defluire	56
10.2.2 Progettazione idraulica dei cornicioni di gronda e dei canali di gronda (secondo UNI EN 12056-3)	57
10.2.3 Progettazione idraulica dei pluviali.	58

SCHEDE di Matteo Fiori

SCHEDA 1

Copertura discontinua a falde, isolata in estradosso e ventilata 61

Elemento portante: travi in legno. Elemento di tenuta: tegole in laterizio. Elemento termoisolante: lana di roccia.

SCHEDA 2

Copertura discontinua a falde, isolata in estradosso e ventilata, con secondo assito 75

Elemento portante: travi in legno. Elemento di tenuta: tegole in laterizio. Elemento termoisolante: lana di roccia.

SCHEDA 3

Copertura discontinua a falde, isolata in estradosso e ventilata 89

Elemento portante: travi in legno. Elemento di tenuta: tegole bituminose. Elemento termoisolante: lana di roccia.

SCHEDA 4

Copertura discontinua a falde, isolata in intradosso e ventilata 103

Elemento portante: travi in legno. Elemento di tenuta: tegole in laterizio. Elemento termoisolante: lana di roccia.

SCHEDA 5

Copertura discontinua a falde, isolata in estradosso e non ventilata 117

Elemento portante: solaio in laterocemento. Elemento di tenuta: tegole in laterizio. Elemento termoisolante: lana di roccia.

SCHEDA 6

Copertura discontinua a falde, isolata e non ventilata 131

Elemento portante: travi in legno. Elemento di tenuta: lamiera metallica. Elemento termoisolante: lana di roccia.

SCHEDA 7

Copertura discontinua a falde, isolata e non ventilata 145

Elemento portante: travi in acciaio. Elemento di tenuta: lastre metalliche. Elemento termoisolante: lana di roccia.

SCHEDA 8

Copertura continua piana, isolata e non ventilata 159

Elemento portante: travi in acciaio. Elemento di tenuta: membrana flessibile. Elemento termoisolante: lana di roccia.

SCHEDA 9

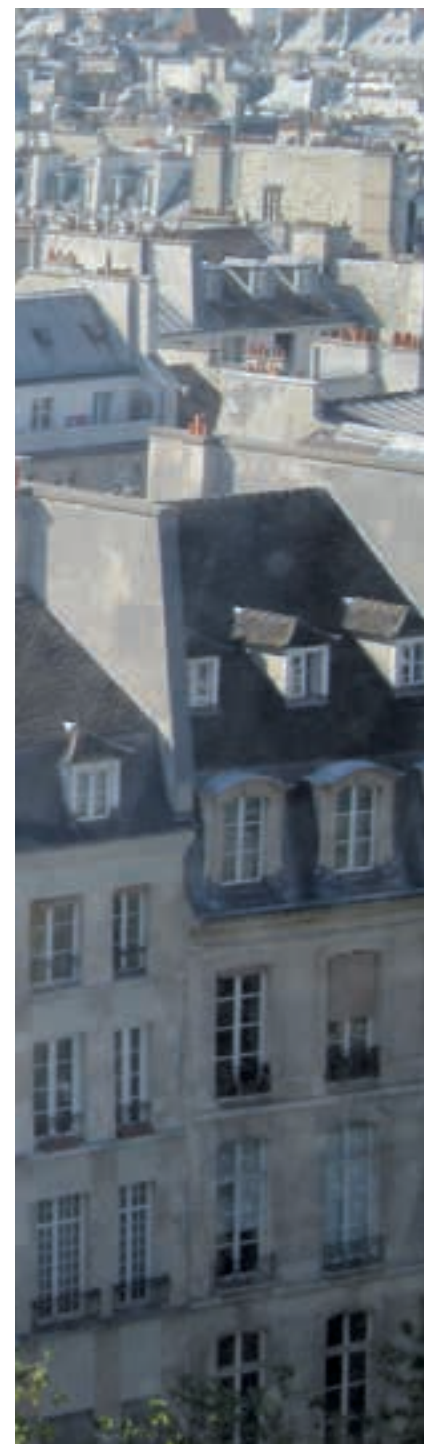
Copertura continua piana, isolata e non ventilata 169

Elemento portante: solaio in laterocemento. Elemento di tenuta: membrana flessibile bituminosa. Elemento termoisolante: lana di roccia.

APPENDICE NORMATIVA 181

APPENDICE TECNICA 185

BIBLIOGRAFIA 188



CAPITOLO 1

Il progetto dei sistemi di copertura a falda

1.1 Introduzione

L'edificio oltre che attraverso le sue varie interpretazioni funzionali, produttive, estetiche, economiche, si manifesta con significati simbolici. Il tetto in particolare assume una valenza primaria nell'immaginario collettivo come sinonimo della casa. Apparentemente semplice, tra i vari elementi che compongono una casa, il tetto, nelle sue svariate configurazioni, è la parte progettualmente più complessa. Si tratta infatti dell'elemento costruttivo maggiormente esposto agli agenti climatici e sul quale convergono molteplici funzioni, molte delle quali orientate all'attivazione di condizioni interne confortevoli.

La storia dell'architettura dei tetti trova sostanza e differenziazioni sia nelle diversità climatiche che nella disponibilità di materiali del sito o nell'evoluzione degli impianti strutturali, ma anche per quanto riguarda aspetti legati a funzioni specifiche di tipo abitativo. Ad esempio nei paesi arabi i tetti piani assumono la funzione tradizionale di luogo esterno abitativo o di collettori di acque piovane verso serbatoi. Nel caso delle coperture discontinue i vani sottostanti alla copertura, frazionati su più piani, diventano spazi abitativi, come nel caso della mansarda parigina.

Le coperture a falde inclinate (dette discontinue nella terminologia UNI) sono state, seppur con varia gradazione, una costante tipica dei paesi europei, e in particolare di quelli caratterizzati dalla disponibilità di legname e da una rilevante intensità degli eventi meteorici.

Ulteriori differenze relative alla tipologia a falde inclinate riguardano il tegumento esterno, anche in questo caso fortemente dipendente dai materiali di base disponibili. Ciò riguarda ad esempio le tegole in laterizio usate in Italia fin dai tempi dei romani in ragione della disponibilità di banchi di argilla, l'ardesia della Liguria, le pietre tipiche nelle Alpi, le piastrelle ceramiche, le tegole in cemento "nate" in Germania attorno al 1850, le lastre di piombo, le lamiere in rame, le scandole in legno nei paesi più a settentrione dove la foresta era la caratteristica ambientale più diffusa.

Ai materiali di tegumento più tradizionali si sono via via aggiunti nuovi materiali, come zinco, lamiera zincata, acciaio inossidabile o leghe a base di rame-zincotitanio, ma anche a base bituminosa (tegole canadesi) e addirittura la plastica. Un esempio interessante di copertura a falde inclinate con funzioni di pedonabilità è quello del Duomo di Milano o di altre cattedrali dove la funzione impermeabile è assegnata a grandi lastre di marmo di Candoglia, opportunamente sagomate. Per quanto attiene alla conformazione delle coperture discontinue, molti esempi soprattutto del passato si evidenziano per la loro fantasia creativa.

Una particolare tipologia di copertura, già nota nel Medioevo, è caratterizzata dal fatto che ciascuna falda è organizzata su due pendenze diverse (quella verso la gronda più pendente rispetto a quella verso il colmo). La soluzione, applicata particolarmente in edifici in legno utilizzati come deposito agricolo nell'Europa



Figura 1.1 - Coperture di Toledo (fonte: Tiziana Poli)

continentale, trova la sua motivazione nella possibilità di ampliare il volume dell'ambiente, pur utilizzando elementi lignei di dimensione normale. Una particolare tipologia di copertura fu messa a punto da François Mansart (1598–1666): tale tipologia consentiva di realizzare diversi piani nel sottotetto. Per questo motivo ha trovato una sua applicazione estensiva a partire dal 1850 nella ricostruzione di Parigi.

La principale motivazione era legata alla riduzione della tassazione degli edifici, che a Parigi dipendeva dal numero di piani al di sotto della linea di gronda. La tipologia a mansarda a quattro orientamenti di falda caratterizza molte architetture francesi del periodo del cosiddetto "secondo impero" e molte architetture vittoriane in Inghilterra e in America. La disponibilità di nuovi materiali e la necessità di coprire strutture edilizie di grande luce allargano oggi il concetto di copertura a falda, che assume una particolare importanza come elemento di forte connotazione in molte opere dell'architettura contemporanea.

A parte le esperienze di punta relative alle tensostrutture, nuove tendenze architettoniche tendono a superare la separazione concettuale tra copertura e facciata. Gli esempi più consistenti sono rappresentati dalle architetture di Gehry.

1.2 Il tetto: alcuni problemi di progettazione tecnologica

Come già osservato, le coperture discontinue nella loro semplicità nascondono una complessità progettuale di tutto rispetto.

Ad esempio il tipo di materiale che viene usato come tegumento impermeabile determina stratigrafie e soluzioni profondamente diverse.

Nel caso di coperture in lamiera il problema principale è il controllo della condensazione interstiziale dovuta alla presenza di uno strato esterno impermeabile al vapore. L'adozione di una barriera al vapore diventa quindi obbligatoria. Nel caso di strati impermeabili in tegole o comunque costituiti da piccoli elementi e quindi caratterizzati da una propria traspirabilità, importante diventa la pendenza, che deve essere evidentemente coerente sia con la specificità della conformazione geometrica di tali elementi, sia con l'intensità con cui si determinano gli eventi meteorici, in particolare la pioggia associata al vento e la neve. Va in ogni caso detto che è oramai regola molto applicata la messa in opera di membrane impermeabili all'acqua e traspiranti al vapore poste direttamente al di sopra dello strato isolante.

Ciò anche in ragione della scarsa attenzione alla manutenzione ordinaria che un tempo prevedeva un controllo annuale della eventuale dislocazione delle tegole. Nel caso della neve e dei possibili problemi legati al suo scivolamento, oltre alla collocazione di elementi paraneve, in alcune applicazioni è previsto il fissaggio meccanico con ganci dei vari elementi che compongono il tegumento impermeabile alla struttura sottostante.

Per quanto riguarda l'azione del vento, in zone molto ventose diventano necessari sistemi di vincolo che possono portare, come nel triestino e istriano, a dover alettare i coppi ad un supporto laterizio.

Anche l'impianto strutturale condiziona l'impianto stratigrafico della copertura. Infatti, nel caso di supporti lignei, la traspirabilità all'aria (che non sussiste nel caso di supporti latero-cementizi) può determinare importanti depositi di condensa che possono aggravare in modo drammatico il fenomeno della condensazione interstiziale. In presenza di vento la falda in depressione può, infatti, richiamare verso l'esterno aria umida che incontrando strati freddi giunge a saturazione.



Figura 1.2 - Parigi, vista di insieme delle coperture a falda multipla (fonte: Tiziana Poli)

La stessa cosa può avvenire in presenza di sistemi di climatizzazione ad aria, che possono mettere in pressione l'ambiente interno e determinare flussi importanti di aria umida verso l'esterno e quindi consistenti condensazioni. Come si vede in questo caso, il controllo dell'impermeabilità all'aria del sistema diventa molto importante. Tuttavia assume ancor maggior centralità in edifici low energy, in quanto le dispersioni dovute ai cosiddetti ricambi parassiti possono assumere una rilevanza percentuale notevole.

Un altro aspetto da considerare riguarda ancora la neve. I problemi che possono generarsi sono molteplici e si aggiungono a quello, a tutti noto, del controllo dello scivolamento delle masse nevose.



Ad esempio, l'omogeneità dell'isolamento termico e l'eliminazione dei ponti termici sono essenziali per evitare che in specifiche posizioni si possano determinare fusioni di neve in grado di portare localmente a battenti d'acqua e a importanti filtrazioni non controllabili dalla geometria di sovrapposizione degli elementi discontinui.

Un elevato e continuo termoisolamento è estremamente benefico in quanto elimina il rischio che il manto nevoso sia sottoposto a liquefazioni (fusioni) al suo intradosso che, scorrendo verso le gronde, provocano in tale posizione pericolose formazioni di ghiaccio, causando problemi di sicurezza nei marciapiedi sottostanti.

Un altro aspetto da considerare attentamente, soprattutto ma non solo nel caso di riutilizzo di vecchi coppi in laterizio (caratterizzati da porosità che possono essere consistenti), come accade in interventi su edifici storici, è costituito dalla necessità di una efficace aerazione all'intradosso in modo da consentire una rapida evaporazione in estradosso e in intradosso di acqua assorbita dopo un evento piovoso. La persistenza di condizioni di saturazione idrica attiva rischi connessi alla proliferazione di muffe e, in caso di gelo, all'attivazione di fenomeni espansivi, che possono provocare importanti disgregazioni.

In alcuni casi e in zone con clima rigido, in presenza di impianti strutturali in legno, può diventare opportuno che lo strato di tenuta all'aria, posto al di sotto dello strato isolante, abbia particolari funzioni di barriera al vapore per evitare altri apporti di umidità (in questo caso continui) verso tali elementi porosi.

Un'altra attenzione va data al dettaglio a ridosso della gronda per ciò che attiene allo strato di controllo di eventuali filtrazioni attraverso il tegumento impermeabile discontinuo. Tale strato deve essere connesso alla gronda per scaricare le acque nella gronda stessa evitando colature idriche sulla facciata. Esso deve essere quindi sostenuto per evitare imborsamenti del telo dovuti a battenti idrici.

1.3 Il tetto e le condizioni di benessere negli ambienti sottostanti

Il tetto, come elemento fondamentale di protezione della casa dagli agenti atmosferici, ha assunto nel tempo altre funzioni e, in particolare, quella di contribuire in termini molto consistenti all'attivazione di condizioni interne confortevoli sia per ciò che attiene agli aspetti termici che per quelli acustici.

Per quanto riguarda il primo aspetto è necessario distinguere tra condizioni invernali ed estive.

Come è noto la sensorialità termica è condizionata sia da scambi convettivi (temperatura dell'aria) che da scambi radiativi. In termini molto semplificati si può dire che metà dell'influenza sensoriale è dovuta alla temperatura dell'aria e metà ad una media opportunamente ponderata della temperatura delle superfici che delimitano l'ambiente (temperatura radiante). In questo senso si parla di temperatura operativa od operante come media tra la temperatura dell'aria e la temperatura radiante.

Lo sviluppo superficiale della copertura, di gran lunga maggiore rispetto a quello delle chiusure verticali che delimitano lo spazio abitabile sottostante, influisce in modo particolarmente consistente sulla cosiddetta temperatura radiante. Le coperture debbono essere quindi molto più isolate termicamente delle chiusure verticali per ottenere una temperatura operante analoga a quella presente negli ambienti dei piani inferiori. Un altro vantaggio dovuto a un forte isolamento della copertura è costituito dal fatto che, diminuendo i moti convettivi a ridosso del soffitto (al contrario di ciò che avviene nel caso di soffitti freddi o coperture poco isolate), risultano ridotti gli apporti di polvere e quindi i fenomeni di termoforesi che determinano la necessità di frequenti ripitturazioni delle superfici.

Il comportamento della copertura durante la stagione estiva può essere fonte di maggiore discomfort.

La copertura è infatti irraggiata dal sole durante tutta la giornata: la quantità di energia solare che viene intercettata in una giornata estiva da ogni metro quadrato di copertura è superiore a quella intercettata dalla pareti verticali. Naturalmente la pendenza e la conformazione del tetto possono ridurre o incrementare tale aspetto.

Anche in questo caso, al fine di evitare surriscaldamenti dell'ambiente sottostante, la copertura deve possedere resistenze termiche superiori a quelle che si riscontrano nelle chiusure verticali. Essendo la ventilazione naturale degli ambienti interni l'unico sistema di asportazione del calore entrante durante una giornata assoluta in stagione estiva, per evitare surriscaldamenti si dovrebbe dimensionare la resistenza dell'involucro nelle sue varie componenti in modo da ridurre al massimo tali apporti, equilibrandoli alle potenzialità della ventilazione naturale.



Figura 1.3 - Tetto in paglia, impermeabile e traspirante; tipico delle zone tropicali come lo Yucatan, la sua particolare configurazione permette l'areazione degli ambienti sottostanti (fonte: Sergio Croce)



Figura 1.4 - Nuovo terminal dell'aeroporto di Madrid-Barajas progettato da Richard Rogers Partnership e Estudio Lamela. Segno caratterizzante l'edificio è la linea sinuosa della copertura, elemento che unifica l'intero progetto (fonte: Sergio Croce)

Ciò diventa importante quando l'ambiente sottostante non è caratterizzato dalla presenza di masse inerziali e non dispone quindi di masse sufficienti a ridurre le pulsazioni termiche dovute agli apporti solari che non possono essere smaltiti dalla ventilazione naturale.

È bene osservare che la ventilazione degli ambienti interni dipende da molti fattori, come la presenza di riscontri o di differenze di quota tra luoghi di ingresso e di uscita dell'aria e la presenza di impianti distributivi liberi che facilitano il movimento dell'aria. Il controllo del flusso termico entrante può essere migliorato attraverso la ventilazione della copertura. Va però osservato che all'aumentare della resistenza termica della copertura il contributo della ventilazione si riduce proporzionalmente, fino ad essere ininfluenza nelle coperture iperisolate.

Un altro aspetto attinente alle condizioni di benessere riguarda la protezione dai rumori, a cui deve contribuire la copertura. Per quanto riguarda questo aspetto, la dislocazione del tetto è tale da ridurre già di per se stessa la rumorosità esterna nelle vicinanze di aeroporti; l'impatto della rumorosità esterna richiede, infatti, particolare attenzione.

Nel caso di supporto strutturale latero-cementizio o cementizio, l'azione della massa areica offre già una certa protezione che viene incrementata dagli strati soprastanti. Nel caso di supporti lignei è la sovrapposizione di molteplici strati leggeri che determina il comportamento acustico della copertura.

Nel caso di una chiusura omogenea il potere fonoisolante è funzione della capacità di dissipazione di un unico strato massivo e quindi del suo basso rendimento di trasporto dell'energia acustica. In questo caso la riduzione di tale rendimento è funzione diretta della sua massa areica, intesa come il peso di un metro quadrato della chiusura stessa. Nel caso delle coperture con supporto strutturale ligneo, il potere fonoisolante dipende dalla dissipazione offerta dalla presenza di più strati leggeri che vibrano in autonomia: ciascuno strato per vibrare ha bisogno di consumare energia ed è in tale modo che l'energia sonora viene dissipata.

Ogni strato quindi è caratterizzato da uno specifico rendimento di trasporto dell'energia acustica. Noto il rendimento di ciascuno strato, il rendimento complessivo del sistema di trasporto (nel nostro caso della chiusura pluri-strato), e quindi del suo potere fonoisolante, è dato dal prodotto dei singoli rendimenti.

È su tale principio che risiede la capacità di stratigrafie leggere (di per se stesse caratterizzabili, secondo la legge di massa, da ridotti poteri fonoisolanti) di sviluppare complessivamente anche elevati poteri fonoisolanti.

Va inoltre osservato come, per alcuni pannelli isolanti fibrosi e permeabili come la lana di roccia, la prestazione isolante non dipenda dalla sua massa areica, ma dalla particolare struttura in base alla quale le fibre, singolarmente sottoposte all'azione vibratoria dell'aria, sviluppano autonomamente dissipazioni dell'energia acustica. Per inciso osserviamo che tale comportamento non si riscontra ad esempio in materiali leggeri cellulari. Va però osservato che, essendo l'aria il sistema di trasporto dei rumori aerei è estremamente importante che la copertura sia caratterizzata da una perfetta impermeabilità all'aria, come d'altra parte già osservato per quanto riguarda il controllo delle condensazioni. Anche singole permeabilità di ridotta consistenza geometrica, dovute ad esempio ad una maldestra posa in opera, possono ridurre considerevolmente il potere fonoisolante di un sistema di copertura potenzialmente efficiente.

Nei sistemi di copertura leggera in legno, in presenza di una forte rumorosità, ad esempio aeroportuale, altre azioni possono migliorare notevolmente il comportamento acustico della copertura. Nel caso di finiture di intradosso in gesso rivestito, un loro vincolo elastico alla struttura migliora il potere fonoisolante del complesso stratigrafico. Anche le modalità di vibrazione dei singoli strati, se si sviluppano maggiormente su diversi range di frequenza, possono ottimizzare la prestazione sul complessivo spettro delle frequenze udibili. È poi importante osservare che nel caso di chiusure multistrato è sempre consigliabile disporre di dati sperimentali.

Un ultimo tema da affrontare riguarda la rumorosità prodotta dalla grandine che attiva un rumore aereo, ma contemporaneamente un rumore d'urto. Diverse quindi sono le strategie progettuali. Per quanto attiene la rumorosità aerea, essa dipende dalle caratteristiche dei componenti dell'elemento di tenuta che può sviluppare una sonorità particolare. In ogni caso tale rumorosità si controlla attraverso il potere fonoisolante del sistema. Un caso a parte è costituito dalle lamiere, la cui sonorità sotto l'azione della grandine può essere ridotta se fatte riposare in modo continuo su uno strato ammortizzante come può essere un isolante leggero.

Per quanto riguarda la trasmissione solida del rumore d'urto, il suo controllo può avvenire attraverso l'articolazione elastica o pseudo-elastica dei vari sistemi di trasporto del rumore solido dall'elemento di tenuta all'elemento strutturale, controllando cioè i ponti acustici. Nel caso di articolazioni lignee, laddove la trasmissione dei carichi avvenga esclusivamente, ad esempio, attraverso pannelli in lana di roccia, la struttura stessa pseudo elastica di tali pannelli è in grado di ammortizzare la trasmissione solida del rumore. Nel caso invece in cui la trasmissione dei carichi avvenga attraverso materiali rigidi, in situazioni molto critiche è necessario prevedere ammortizzatori elastici in grado di impedire la trasmissione di tali rumori negli ambienti sottostanti.



Figura 1.5 - Aeroporto di Madrid, esterno

CAPITOLO 2

Il sistema copertura

Sia nel caso di copertura piana, sia a falda singola o a falda multipla, o di un sistema misto o, più ancora, di un sistema geometricamente complesso, la copertura fonda il suo modello di funzionamento su questioni tecniche "semplici":

- il controllo del flusso di calore attraverso la presenza di uno strato isolante;
- il controllo della persistenza o formazione della condensa interstiziale mediante la ventilazione o tramite l'aggiunta di uno strato di controllo alla diffusione del vapore;
- il controllo dell'impermeabilità all'acqua per mezzo dell'elemento di tenuta.

La realtà progettuale è, al contrario, molto più complessa e articolata e tale complessità è legata a molti aspetti tra cui i principali sono:

- la compatibilità fisica, meccanica e chimica degli elementi/strati che garantiscono la funzionalità della copertura;
- la compatibilità prestazionale degli elementi/strati in funzione della prestazione obiettivo di progetto rispetto a specifiche esigenze di safety e security, di benessere per chi vive e occupa l'ambiente costruito, di riduzione del fabbisogno energetico dell'edificio, di durabilità e manutenibilità, di aspetto;
- la compatibilità in termini di tempo di vita utile di ogni singolo elemento/strato rispetto alla durata dell'intero sistema.

L'architettura contemporanea con le sue forme, dalle più tradizionali¹ alle più indefinite (come ad esempio quelle proposte da F.O. Gehry - Figura 2.1 -, o da Renzo Piano - Figura 2.2 -, dove non è percepibile una netta separazione tra ciò che è definibile come chiusura orizzontale superiore e parete perimetrale verticale), e la continua ricerca di soluzioni tecniche "altre" rispetto a quelle proprie di una prassi costruttiva consolidata, amplifica queste complessità.

Indipendentemente dalla soluzione tecnica o architettonica, la necessità di definire un'identità prestazionale del sistema, prima ancora della sua identità formale, è il punto di partenza per un buon progetto (e di conseguenza risultato).



Figura 2.1 - F.O. Gehry, Museo Guggenheim, Bilbao (fonte: Rockwool)

Figura 2.2 - Auditorium Parco della Musica a Roma di Renzo Piano (fonte: Tiziana Poli)

¹ Il riferimento è alla copertura a doppia falda con strato di finitura in piccoli elementi in cotto (coppi o tegole).

2.1 Requisiti caratteristici delle chiusure orizzontali superiori

L'identità prestazionale del sistema di copertura non può prescindere dall'identificazione, in funzione del contesto di riferimento, di una serie di requisiti che caratterizzano il comportamento di una chiusura orizzontale superiore. Tra i requisiti critici si identificano:

Requisito		di sistema	di elemento/strato
Resistenza meccanica	Resistenza ai carichi statici (carico permanente e sovraccarico determinato dalla presenza di acqua e neve)	■	■
	Resistenza ai carichi dinamici (vento, sisma)	■	■
	Resistenza alle deformazioni	■	■
Sicurezza al fuoco	Resistenza al fuoco	■	
	Reazione al fuoco		■
	Tossicità fumo		■
Sicurezza nell'uso	Sicurezza da caduta	■	
	Visibilità degli elementi trasparenti	■	
	Scabrosità superficiale		■
Protezione contro le azioni esterne	Resistenza alle intrusioni		■
	Resistenza alle esplosioni	■	
	Resistenza all'abrasione		■
	Resistenza agli agenti chimici, biologici e radiativi		■
	Resistenza agli urti (da corpo duro e molle)	■	

Tabella 2.1 - Requisiti relativi a safety e security

Requisito		di sistema	di elemento/strato
Comfort termico e controllo condensa interstiziale	Isolamento termico		■
	Controllo dell'inerzia termica	■	■
	Controllo della condensazione interstiziale	■	■
	Controllo della temperatura superficiale	■	■
	Controllo della temperatura aria-sole		■
Comfort acustico	Isolamento acustico	■	■
	Non rumorosità (in caso di fruibilità, pioggia battente o grandine)	■	■
	Assorbimento acustico		■
Tenuta	Tenuta all'acqua		■
	Permeabilità all'aria		■
	Assorbimento capillare		■
	Capacità di deflusso acque meteoriche	■	■
Greenability	Recupero acqua meteorica	■	■
	Attrezzabilità a verde	■	■
Comfort tattile	Interno ed esterno (se copertura praticabile)		■
Qualità dell'aria	Non emissione di sostanze nocive (VOC, ozono, radon)		■

Tabella 2.2 - Requisiti relativi a benessere e igienicità

Requisito		di sistema	di elemento/strato
Resistenza agli agenti naturali	Resistenza alle temperature		■
	Resistenza agli agenti radiativi		■
	Resistenza ai raggi UV		■
	Resistenza allo shock termico		■
	Resistenza agli agenti biologici (muffe)		■
	Resistenza alle piogge acide		■
	Controllo dei depositi differenziali di polveri	■	
Resistenza agli agenti chimici e alle azioni meccaniche	Resistenza all'usura da calpestio (veicolare e pedonale)		■
	Resistenza agli agenti chimici		■
Compatibilità fisico-chimica degli strati	Resistenza ai carichi (distribuiti e concentrati)		■
	Compatibilità chimica		■
Manutenzione	Pulibilità	■	■
	Sostituibilità	■	■
Flessibilità	Sostituibilità finitura interna	■	■
	Up-grading prestazionale dal punto di vista termico	■	■
	Compatibilità tecnologica con elementi/superfici verticali	■	
	Compatibilità architettonica con elementi/superfici verticali	■	

Tabella 2.3 - Requisiti relativi alla durabilità e alla manutenibilità

Requisito		di sistema	di elemento/strato
Contenimento dei consumi energetici	Embodied Energy	■	■
	Emissione CO ₂	■	■
	Riciclabilità	■	■

Tabella 2.4 - Requisiti relativi alla sostenibilità e al contenimento dei consumi energetici

Requisito		di sistema	di elemento/strato
Trasportabilità dei componenti/materiali	Dimensione e volume		■
Stoccaggio in cantiere	Stoccaggio		■
	Infiammabilità	■	■

Tabella 2.5 - Requisiti relativi alla sicurezza in fase di costruzione

Requisito		di sistema	di elemento/strato
Regolarità di aspetto	Uniformità di colore		■
	Planarità		■
	Uniformità della superficie		■

Tabella 2.6 - Requisiti relativi all'aspetto

2.2 Tipologie e modelli funzionali delle chiusure orizzontali superiori

La scelta del sistema di chiusura orizzontale superiore, o meglio della copertura, dipende da differenti fattori strettamente correlati tra loro. Primi fra tutti le forzanti climatiche esterne (variabili in funzione della collocazione geografica, dell'orientamento dell'edificio e delle possibili emergenze architettoniche presenti nell'intorno che potrebbero mitigare o potenziare i parametri climatici²) e il modello di funzionamento dell'intero organismo edilizio. La sequenza degli strati e, prima ancora, il modello funzionale della copertura non possono, infatti, essere definiti senza tener conto del modello di esercizio dell'edificio (destinazione d'uso) e della prestazione obiettivo di progetto (prestazione ambientale³ e prestazione tecnologica).

Una prima classificazione del sistema copertura può essere operata in funzione della soluzione adottata per garantire l'impermeabilità rispetto all'acqua meteorica. Indipendentemente dalla soluzione tecnica adottata, l'elemento di tenuta (singolo strato o insieme di più elementi o strati con funzione di tenuta) non deve subire alcuna alterazione nel tempo (decadimento fisico e prestazionale) sotto l'azione continua di sollecitazioni fisiche (temperatura di esercizio o di posa, agenti radiativi, acqua meteorica, acqua connessa al procedimento costruttivo, formazione di condensa interstiziale), meccaniche (sollecitazioni statiche e dinamiche) e chimiche. In funzione del tipo e del posizionamento dell'elemento di tenuta è possibile operare una prima classificazione distinguendo tra copertura continua e copertura discontinua.

Una **copertura** si definisce **continua** quando la tenuta all'acqua non dipende dalla pendenza o dalla particolare configurazione geometrica della chiusura ma viene garantita da un elemento - membrana impermeabile - posato in soluzione di continuità. La collocazione dell'elemento di tenuta rispetto ai differenti strati costituenti la soluzione tecnica determina differenti modelli funzionali (UNI 8178):

- tetto rovescio con l'elemento di tenuta posto sotto lo strato di isolamento termico;
- tetto caldo con elemento di tenuta posto sotto lo strato di protezione;
- tetto caldo con elemento di tenuta posto all'estradosso della copertura che può essere lasciato a vista.

Il vantaggio nell'adozione di una copertura piana è principalmente legato alla sua fruibilità e alla sua potenzialità. Questa distinzione di termini vuole sottolineare un diverso uso della copertura. Il primo identifica un impiego "a servizio" dell'intero organismo edilizio: si tratta di una superficie utile per la collocazione di impianti. Il secondo rende l'idea del valore aggiunto; la copertura diviene uno spazio strutturato in grado di accogliere differenti funzioni e di avere differenti connotazioni architettoniche.

Di contro le attenzioni progettuali e di posa in opera sono molteplici. La non cura dei nodi costruttivi può essere causa di infiltrazioni di acqua, ma non solo. I rilievi verticali in corrispondenza delle soglie, dei camini e dei lucernari, le discontinuità orizzontali come i giunti di dilatazione o i dispositivi di raccolta e convogliamento dell'acqua, il tracciato delle pendenze per l'evacuazione dell'acqua meteorica e il dimensionamento dei pluviali diventano i punti critici di questo sistema. La presenza di acqua in tutte le sue forme può essere causa di degrado del sistema. Ad esempio il ristagno di acqua in copertura può generare dei sovraccarichi con relativa attivazione di tensionamenti dell'elemento di tenuta o una differente esposizione termica, se non protetto.

A garantire la funzionalità delle **coperture discontinue**, a differenza delle coperture continue, è la pendenza del piano di posa. L'elemento di tenuta, singolo sotto forma di membrana o costituito da più elementi distinti e messi in opera sovrapposti (tegole, coppi, lastre in spessore o sottili - metalliche), può essere collocato:

- sotto lo strato di protezione;
- all'estradosso della copertura.

² Ad esempio le dimensioni e la morfologia del canyon urbano possono incidere sulla velocità e sulla direzione del vento, così come la presenza di ostruzioni a grande elevazione può mettere in ombra in modo permanente il "tetto" interamente o solo parzialmente (indicatore utile quando l'elemento di tenuta è superficiale e, quindi, potenzialmente soggetto ad alterazioni dimensionali o del comportamento meccanico imputabili a variazioni delle temperature superficiali).

³ Controllo della temperatura operante (t_{op}), controllo della temperatura superficiale (t_{sup}), controllo dell'umidità relativa, controllo del livello di illuminamento e controllo del livello sonoro.

Il tetto a falda (singola, doppia o multipla) permette un maggior controllo dei sovraccarichi "statici" (componente verticale del carico dovuto alla permanenza di neve) mentre maggiore attenzione deve essere riservata a eventuali sollecitazioni di tipo dinamico (solo vento, vento + acqua meteorica, acqua dovuta allo scioglimento della neve, eventi sismici). I punti critici, oltre i raccordi con le superfici verticali, sono correlati al controllo delle pendenze (per evitare la traslocazione degli elementi di tenuta), alle linee di raccordo tra le falde a differente pendenza, alla realizzazione dei canali di gronda, delle converse e dei pluviali (posizionamento, dimensionamento e tipologia di fissaggio).

	Pendenza			Accessibilità, fruibilità e vivibilità						Posizione elemento tenuta			Caratteristiche elemento tenuta			
	Copertura orizzontale, pendenza < 1%	Copertura suborizzontale, 1% < pendenza < 5%	Copertura inclinata, pendenza >5%	Accessibile per manutenzione copertura	Accessibile per manutenzione impianti	Accessibile a pedoni	Copertura a verde	Coperture a destinazione speciale	Copertura per parcheggio mezzi leggeri	Copertura per parcheggio mezzi pesanti	Estradosso della copertura	Sottostrato protezione	Sottostrato isolante	Grandi elementi	Piccoli elementi	Membrane
Copertura continua	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■			■
Copertura discontinua			■	■	■			■			■	■		■	■	

Tabella 2.7 - Il sistema di copertura: matrice delle soluzioni tecniche in funzione dell'elemento di tenuta (rielaborazione UNI 8627)

In relazione al grado di isolamento termico della copertura e alla modalità di evaporazione della condensazione interstiziale è possibile compiere una ulteriore classificazione delle chiusure orizzontali superiori.

E' così possibile distinguere in:

- copertura continua isolata;
- copertura continua isolata e ventilata;
- copertura continua non isolata;
- copertura discontinua isolata;
- copertura discontinua isolata e ventilata;
- copertura discontinua ventilata;
- copertura discontinua non isolata;
- copertura discontinua ventilata sottotetto.



Figura 2.3 - Schema funzionale delle coperture a falda

Ad ogni specifico modello funzionale corrisponde una sequenza e una presenza di strati. Qui di seguito si riportano le indicazioni fornite dalla norma UNI 8627.

SCHEMI FUNZIONALI

COPERTURE DISCONTINUE	COPERTURA CON ELEMENTO TERMOISOLANTE			
	COPERTURA CON ELEMENTO TERMOISOLANTE		COPERTURA SENZA ELEMENTO TERMOISOLANTE	
	Con strato ventilazione	Senza strato ventilazione	Con strato ventilazione	Senza strato ventilazione
Elemento o strato funzionale				
Strato di schermo al vapore/barriera vapore	eventuale			
Elemento termoisolante	fondamentale	fondamentale		
Strato di tenuta all'aria	eventuale		eventuale	
Strato di collegamento	eventuale			
Strato di ventilazione	fondamentale		fondamentale	
Strato di pendenza	integrato	integrato	integrato	integrato
Elemento portante	fondamentale	fondamentale	fondamentale	fondamentale
Elemento di collegamento		eventuale		
Strato di supporto		eventuale		
Strato di schermo vapore/barriera vapore		fondamentale		
Elemento termoisolante		fondamentale		
Strato di irrigidimento		eventuale		
Elemento di collegamento	eventuale	eventuale	eventuale	eventuale
Elemento di tenuta		eventuale	eventuale	eventuale
Elemento di supporto*	fondamentale	fondamentale	fondamentale	fondamentale
Elemento di collegamento	eventuale	eventuale	eventuale	eventuale
Elemento di tenuta	fondamentale	fondamentale	fondamentale	fondamentale
Strato di protezione	eventuale	eventuale	eventuale	eventuale

Tabella 2.8 - Il sistema di copertura discontinuo: il modello funzionale e gli strati o elementi funzionali

SCHEMI FUNZIONALI

COPERTURE CONTINUE	SCHEMI FUNZIONALI			
	Copertura con elemento termoisolante		Copertura senza elemento termoisolante	
	Con strato ventilazione	Senza strato ventilazione	Con strato ventilazione	Senza strato ventilazione
Elemento o strato funzionale				
Elemento portante	fondamentale	fondamentale	fondamentale	fondamentale
Elemento di collegamento		eventuale		eventuale
Strato di continuità		eventuale		eventuale
Strato di imprimitura		eventuale		eventuale
Strato di pendenza		fondamentale		fondamentale
Strato di regolarizzazione	eventuale	eventuale		
Strato di imprimitura		eventuale		
Strato di diffusione pressione vapore		migliorativo		
Strato barriera al vapore/schermo vapore	migliorativo	fondamentale		
Elemento di collegamento (strato incollaggio)	eventuale	eventuale		
Elemento termoisolante	fondamentale	fondamentale		
Elemento di collegamento	eventuale	eventuale		
Strato di irrigidimento/strato di continuità	fondamentale/ complementare	eventuale		
Strato di ventilazione	fondamentale		fondamentale	
Elemento portante	fondamentale		fondamentale	
Elemento di collegamento	eventuale		eventuale	
Strato di continuità	eventuale		eventuale	
Strato di imprimitura	eventuale		eventuale	
Strato di pendenza	fondamentale		fondamentale	
Strato di regolarizzazione	eventuale	eventuale	eventuale	eventuale
Strato di imprimitura	eventuale	eventuale	eventuale	eventuale
Elemento di collegamento	eventuale	eventuale	eventuale	eventuale
Strato di diffusione pressione al vapore	migliorativo	migliorativo	migliorativo	migliorativo
Elemento di collegamento/strato di separazione	migliorativo	migliorativo	migliorativo	migliorativo
Elemento di tenuta	fondamentale	fondamentale	fondamentale	fondamentale
Strato di separazione	migliorativo	migliorativo	migliorativo	migliorativo
Strato drenante	fondamentale/ migliorativo	fondamentale/ migliorativo		
Elemento termoisolante	fondamentale	fondamentale		
Strato filtrante	fondamentale	fondamentale		
Strato di protezione	fondamentale	fondamentale	fondamentale	fondamentale

Tabella 2.9 - Il sistema di copertura continuo: il modello funzionale e gli strati o elementi funzionali

* Nei sistemi discontinui si è spesso in presenza di una micro ventilazione sottotegola; qualora il sistema dal punto di vista termo igrometrico dipenda unicamente da questo strato il sistema viene considerato come non ventilato. La micro ventilazione sottotegola viene considerata con l'elemento di supporto.

CAPITOLO 3

Cenni di progettazione del sistema strutturale delle coperture a falda

Il sistema strutturale che adotta il legno come materiale base è molto utilizzato quando viene effettuato il recupero di un sottotetto ad uso abitativo in quanto la variazione di carico che induce su una struttura esistente è molto limitata. Tuttavia è possibile adottare qualsiasi altra tipologia di materiale, quale acciaio o calcestruzzo o strutture miste. Il capitolo tratta alcuni aspetti generali del progetto delle strutture in legno, lasciando a testi maggiormente specialistici la descrizione delle procedure di progetto complete.

3.1 Concetti strutturali generali

La progettazione delle strutture in legno fa riferimento soprattutto all'EUROCODICE 5, parte 1, ormai presente da molti anni ed aggiornato nel 2009. Il metodo adottato è agli stati limite. Si fa presente che nel nuovo testo unico sulle costruzioni, in vigore da marzo 2008, non è presente la parte dedicata al legno. È quindi necessario verificare lo stato normativo in vigore al momento della progettazione.

Nella maggior parte dei casi di progettazione strutturale rivolta ad edifici residenziali il progettista non si trova di fronte a strutture complesse. Sovente le coperture sono suddivisibili in "corpi" a due o a quattro falde dove la progettazione strutturale consiste nel definire la tipologia di materiale utilizzato e le sezioni geometriche della trave di colmo e dei travetti.

Senza entrare nel dettaglio, si tratta di verificare:

- Stati Limite Ultimi (ovvero sicurezza al collasso, ad esempio capacità portante):

$$S_d < R_d$$

dove:

- S_d è l'azione di progetto;
- R_d è la reazione di progetto;

e:

- Stati Limite di Esercizio (ovvero funzionalità in esercizio, ad esempio deformabilità):

$$E_{sd} < E_{rd}$$

dove:

- E_{sd} è l'azione di progetto;
- E_{rd} è la reazione di progetto.

Nelle verifiche di resistenza è, inoltre, necessario tenere conto della effettiva durata del carico che agisce sulla membratura in questione (classe di durata del carico) e della classe di servizio della struttura (cambia al variare dell'umidità del materiale).

Si introduce quindi un fattore correttivo k_{mod} che va a moltiplicare i valori di resistenza caratteristici ricavati da prove della durata di 5 min.

Per quanto riguarda le classi di durata del carico, si considerano cinque classi:

Classe di durata	Durata del carico	Esempi di carico
Istantaneo		sisma
Breve durata	meno di una settimana	vento
Media durata	1 settimana - 6 mesi	carico imposto dal solaio, neve
Lunga durata	6 mesi- 10 anni	immagazzinaggio
Permanente	più di 10 anni	peso proprio

Tabella 3.1 - Classi di durata dei carichi

Per quanto riguarda le classi di servizio della struttura, si considerano tre classi:

Classe di servizio	Descrizione
1	Umidità legno in equilibrio con ambiente a 20°C ed umidità relativa aria che supera il 65% poche settimane all'anno (umidità media <12%)
2	Umidità legno in equilibrio con ambiente a 20°C ed umidità relativa aria che supera l'85% poche settimane all'anno (umidità media <20%)
3	Condizioni climatiche che prevedono umidità più elevate di quelle della classe di servizio 2

Tabella 3.2 - Classi di servizio della struttura

3.1.1 Valori resistenze di calcolo

I valori di progetto di una resistenza si ricavano dalla seguente formula:

$$R_d = K_{mod} \cdot R_k / (\gamma_m)$$

dove:

- R_d è il valore caratteristico della capacità portante;
- γ_m è il coefficiente parziale per una proprietà materiale;
- K_{mod} è il coefficiente di correzione che tiene conto degli effetti della durata del carico e dell'umidità.

Materiale	Coefficiente parziale raccomandato γ_m
Legno massiccio	1,30
Legno lamellare incollato	1,25

Tabella 3.3 - Stati limite ultimi

Combinazioni fondamentali: Coefficienti parziali raccomandati per le proprietà e la resistenza del materiale γ_m

Materiale	Coefficiente parziale raccomandato γ_m
Legno massiccio e legno lamellare incollato	1,00

Tabella 3.4 - Stati limite di esercizio

Coefficienti parziali raccomandati per le proprietà e la resistenza del materiale γ_m

Materiale	Norma	Classe di servizio	Classe di durata del carico				
			Azione permanente	Azione lunga durata	Azione media durata	Azione breve durata	Azione istantanea
Legno massiccio	EN 14081-1	1	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10
		2	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10
		3	0,50	0,55	0,65	0,70	0,90
Legno lamellare incollato	EN 14080	1	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10
		2	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10
		3	0,50	0,55	0,65	0,70	0,90

Tabella 3.5 - Coefficiente di correzione K_{mod}

3.2 Tipologie e materiali utilizzati

La maggior parte delle strutture in legno viene realizzata o con legname di conifera, quale abete o larice, o con legno cosiddetto "lamellare".

Le proprietà caratteristiche sono le seguenti:

Flessione	$[f_{m,k}]$
Trazione parallela	$[f_{t,0,k}]$
Trazione perpendicolare	$[f_{t,90,k}]$
Compressione parallela	$[f_{c,0,k}]$
Compressione perpendicolare	$[f_{c,90,k}]$
Taglio	$[f_{v,k}]$
Modulo elastico parallelo medio	$[E_{0,mean}]$
Modulo elastico parallelo caratteristico	$[E_{0,05}]$
Modulo elastico perpendicolare medio	$[E_{90,mean}]$
Modulo elastico tangenziale medio	$[G_{mean}]$
Massa volumica caratteristica	$[\rho_k]$
Massa volumica media	$[\rho_{mean}]$

Il legname è un materiale che non è omogeneo e presenta dei difetti: ciò peggiora le prestazioni.

In normativa (UNI EN 11035-2), il legno di conifera italiano può essere suddiviso in tre categorie S1, S2, S3 ed il legno di latifoglia in un'unica categoria S. A seconda della classificazione (per la quale la normativa stabilisce esattamente qual è la procedura da adottarsi di volta in volta), il legname avrà ben definite caratteristiche meccaniche, adottabili nello specifico calcolo.

3.2.1 Resistenza agli organismi biologici

Il legno e i materiali a base di legno devono possedere adeguata durabilità naturale in conformità alla EN 350-2 per la specifica classe di rischio (definita nelle EN 335-1, EN 335-2 e EN 335-3), o devono essere soggetti a trattamento preservante scelto in conformità alla EN 351-1 e EN 460.

PROPRIETÀ	Abete / Nord			Abete / Centro Sud			Larice / Nord			Douglasia / Italia		Altre conifere / Italia			Castagno / Italia	Querce caducifoglie / Italia	Pioppo e Ontano / Italia	Altre latifoglie / Italia	
	S1	S2	S3	S1	S2	S2	S2	S2	S3	S1	S2/S3	S1	S2	S3	S	S	S	S	
Flessione (5-percentile), Mpa	$f_{m,k}$	29	23	17	32	28	21	42	32	26	40	23	33	26	22	28	42	26	27
Trazione parallela alla fibratura (5-percentile), Mpa	$f_{t,0,k}$	17	14	10	19	17	13	25	19	16	24	14	20	16	13	17	25	16	16
Trazione perpendicolare alla fibratura (5-percentile), Mpa	$f_{t,90,k}$	0,4	0,4	0,4	0,3	0,3	0,3	0,6	0,6	0,6	0,4	0,4	0,5	0,5	0,5	0,5	0,8	0,4	0,5
Compressione parallela alla fibratura (5-percentile), Mpa	$f_{c,0,k}$	23	20	18	24	22	20	27	24	22	26	20	24	22	20	22	27	22	22
Compressione perpendicolare alla fibratura (5-percentile), Mpa	$f_{c,90,k}$	2,9	2,9	2,9	2,1	2,1	2,1	4,0	4,0	4,0	2,6	2,6	4,0	4,0	4,0	3,8	5,7	3,2	3,9
Taglio (5-percentile), Mpa	$f_{v,k}$	3,0	2,5	1,9	3,2	2,9	2,3	4,6	3,2	2,7	4,0	3,4	3,3	2,7	2,4	2,0	4,0	2,7	2,0
Modulo di elasticità parallelo alla fibratura (medio), Mpa	$E_{0,mean}$	12000	10500	9500	11000	10000	95000	13000	12000	11500	14000	12500	12300	11400	10500	11000	12000	8000	11500
Modulo di elasticità parallelo alla fibratura (5-percentile), Mpa	$E_{0,05}$	8000	7000	6400	7400	6700	6400	8700	8000	7700	9700	8400	8200	7600	7000	8000	10100	6700	8400
Modulo di elasticità perpendicolare alla fibratura (medio), Mpa	$E_{90,mean}$	400	350	320	370	330	320	430	400	380	470	420	410	380	350	730	800	530	770
Modulo di taglio (medio), Mpa	G_{mean}	750	660	590	690	630	590	810	750	720	880	780	770	710	660	950	750	500	720
Massa volumica (5-percentile), kg/m ³	ρ_k	380	380	380	280	280	280	550	550	550	400	420	530	530	530	465	760	420	515
Massa volumica (media), kg/m ³	ρ_{mean}	415	415	415	305	305	305	600	600	600	435	455	575	575	575	550	825	460	580

Tabella 3.6 - Caratteristiche meccaniche del legno massiccio (riferimento: UNI EN 11035)

Il legno lamellare, per sua intrinseca produzione, è invece maggiormente omogeneo. Anche in questo caso si ha una classificazione in base alle caratteristiche meccaniche. I tipi presenti per legno lamellare incollato omogeneo sono i seguenti (in ordine crescente di migliori caratteristiche meccaniche): GL24h, GL28h, GL32h e GL36h.

Caratteristica		Classe di resistenza del legno lamellare incollato			
		GL 24h	GL 28h	GL 32h	GL 36h
Resistenza a flessione	$f_{m,g,k}$	24	28	32	36
Resistenza a trazione	$f_{t,0,g,k}$	16,5	19,5	22,5	26
	$f_{t,90,g,k}$	0,4	0,45	0,5	0,6
Resistenza a compressione	$f_{c,0,g,k}$	24	26,5	29	31
	$f_{c,90,g,k}$	2,7	3,0	3,3	3,6
Resistenza a taglio	$f_{v,g,k}$	24	3,2	3,8	4,3
Modulo di elasticità	$E_{0,g,mean}$	11600	12600	13700	14700
	$E_{0,g,05}$	9400	10200	11100	11900
	$E_{90,g,mean}$	390	420	460	490
Modulo di taglio	$G_{g,mean}$	720	780	850	910
Massa volumica	$\rho_{g,k}$	380	410	430	450

Tabella 3.7 - Caratteristiche meccaniche del legno lamellare (riferimento: UNI EN 1194)

3.3 Indicazioni per il predimensionamento

Di seguito è presente una tabella per un predimensionamento rapido di travetti in legno lamellare che deve poi essere esattamente verificata secondo le procedure di legge.

Attraverso la tabella è possibile ricavare le dimensioni indicative dei travetti in funzione del carico e della luce. Lo schema è di una trave ad una campata su due appoggi a cerniera. Freccia massima 1/300 luce. Il carico è in kN/m, la luce è in metri, le dimensioni della sezione è in cm.

Luce [m]	Carico per metro lineare [kN/m]								
	2,00	2,50	3,00	3,50	4,00	4,50	5,00	5,50	6,00
3,00	6x16	6x18	6x18	6x20	8x18	8x20	8x20	8x20	8x20
3,50	6x18	6x20	8x20	8x22	8x22	8x22	8x22	8x24	8x24
4,00	8x20	8x22	8x22	8x24	8x24	8x26	8x26	8x26	8x28
4,50	10x20	10x22	10x24	10x24	10x26	10x26	10x28	10x28	10x28
5,00	10x22	10x24	10x26	12x26	12x26	12x28	12x28	12x30	12x30
5,50	10x24	10x26	10x28	12x28	14x26	14x28	14x28	14x30	14x30
6,00	12x26	12x28	12x30	12x30	14x30	14x32	16x30	16x30	16x32
6,50	14x26	14x28	14x30	16x30	16x32	16x32	16x32	16x34	16x34
7,00	14x28	14x30	14x32	16x32	16x34	18x34	18x34	18x36	18x36
7,50	14x30	14x32	14x34	16x34	18x34	18x36	18x36	18x38	18x38
8,00	14x32	14x34	16x30	16x38	20x36	20x38	20x38	20x40	20x40

Tabella 3.8 - Predimensionamento rapido di travetti in legno lamellare. Le misure delle sezioni sono in cm

CAPITOLO 4

Comportamento termico: aspetti di teoria e progettazione

4.1 Comportamento nella stagione invernale

Le coperture, così come ogni altro elemento opaco, sono interessate da un flusso di calore per conduzione (trasmissione) che concorre a determinare le perdite per trasmissione del bilancio energetico invernale dell'edificio. Questa voce può assumere notevole influenza soprattutto nel caso di edifici con un numero limitato di piani o nel caso dell'analisi degli alloggi immediatamente sottostanti la copertura, sia in termini di bilancio energetico, sia delle temperature di comfort.

Il parametro principale per determinare le dispersioni termiche invernali (in regime assimilabile a quello stazionario) è la trasmittanza termica¹(generalmente denominata U o U-value), che rappresenta il flusso di calore che attraversa una superficie unitaria sottoposta a differenza di temperatura pari ad 1°C.

4.1.1 Il calcolo della trasmittanza

Il reciproco del valore di trasmittanza corrisponde alla sommatoria dei vari contributi di resistenza termica che concorrono al calcolo.

$$U = \frac{1}{R} = \frac{1}{\left(R_{si} + \frac{S_1}{\lambda_1} + \frac{S_n}{\lambda_n} + R_n + R_a + R_{se} \right)} \quad \text{in [W/m}^2\text{K]}$$

dove:

- R_{si} è la resistenza liminare della superficie interna della struttura misurata in [m²K/W];
- S/λ è la resistenza termica di uno o più strati di materiale omogeneo misurata in [m²K/W];
- $R_n = 1/C$ è la resistenza termica di strati di materiale non omogeneo misurato in [m²K/W];
- R_a è la resistenza termica di eventuali intercapedini in [m²K/W];
- R_{se} è la resistenza liminare della superficie esterna della struttura misurata in [m²K/W].

La resistenza di uno strato omogeneo corrisponde al suo spessore (in metri) diviso per la conduttività (W/mK) del materiale di cui è costituito. Per un elemento di costruzione a più strati, la resistenza di tutti gli strati deve essere sommata. Per un elemento non omogeneo, ovvero caratterizzato da proprietà termiche non uniformi (è il caso degli strati che presentano al loro interno delle cavità d'aria, quali ad esempio i solai in laterocemento) si deve fare riferimento alla conduttanza C dello strato, espressa in W/m²K, che rappresenta il flusso di calore che avviene unicamente per via conduttiva all'interno del solido in esame. I valori di conduttanza sono riportati nelle apposite norme di riferimento (UNI 10355) o sono ricavabili dai certificati di prova forniti direttamente dai produttori.

Le resistenze superficiali (liminari) tengono conto degli scambi di calore per convezione e per irraggiamento che avvengono tra la superficie e l'aria interna (R_{si}) e la superficie e l'aria esterna (R_{se}). Esse vengono a dipendere essenzialmente dal grado di esposizione e dalla qualità delle superfici.

¹La norma di riferimento per il calcolo della trasmittanza termica è la UNI EN ISO 6946:2008.

Questi valori sono normati nella UNI EN ISO 6946 a seconda della direzione del flusso di calore: per le coperture si hanno tipicamente i seguenti valori: $R_{si}=0.10 \text{ m}^2\text{K/W}$ ed $R_{se}=0.04 \text{ m}^2\text{K/W}$, rappresentativi di superfici con emissività pari a 0.9.

Ciascuna cavità o intercapedine contribuisce con una propria resistenza. All'interno dell'intercapedine avvengono scambi di tipo convettivo e radiativo. Le intercapedini presenti in edilizia nei solai di copertura hanno, tipicamente, una resistenza termica pari a $0.16 \text{ W/m}^2\text{K}$.

La resistenza termica relativa a strati d'aria risulta essere fortemente influenzata dalla velocità dell'aria stessa. In generale, si può dire che, laddove l'aria è ferma, essa presenta il massimo valore di resistenza: la componente convettiva della resistenza termica dell'intercapedine diminuisce all'aumentare della velocità dell'aria. La resistenza termica totale di un componente per edilizia, contenente un'intercapedine d'aria fortemente ventilata, si ottiene trascurando la resistenza termica dell'intercapedine d'aria e di tutti gli altri strati che separano detta intercapedine dall'ambiente esterno. L'aria in un'intercapedine fortemente ventilata si trova, infatti, alla stessa temperatura dell'aria esterna.

Il calcolo si completa includendo una resistenza termica superficiale esterna corrispondente all'aria immobile, ovvero uguale alla resistenza termica superficiale interna del medesimo componente, poiché il rivestimento costituisce un riparo dal vento. Spessori di intercapedine d'aria superiori a 15-25 mm non comportano apprezzabili incrementi della resistenza termica, in quanto i moti convettivi naturali che si instaurano oltre questo spessore vanificano l'effetto di resistenza termica per conduzione dovuto allo strato d'aria.

Inoltre, se l'intercapedine fosse delimitata da superfici aventi bassi valori di emissività emisferiche, si avrebbe una riduzione dello scambio radiativo, e quindi un corrispondente incremento della resistenza di intercapedine (dell'ordine di 2-3 volte).

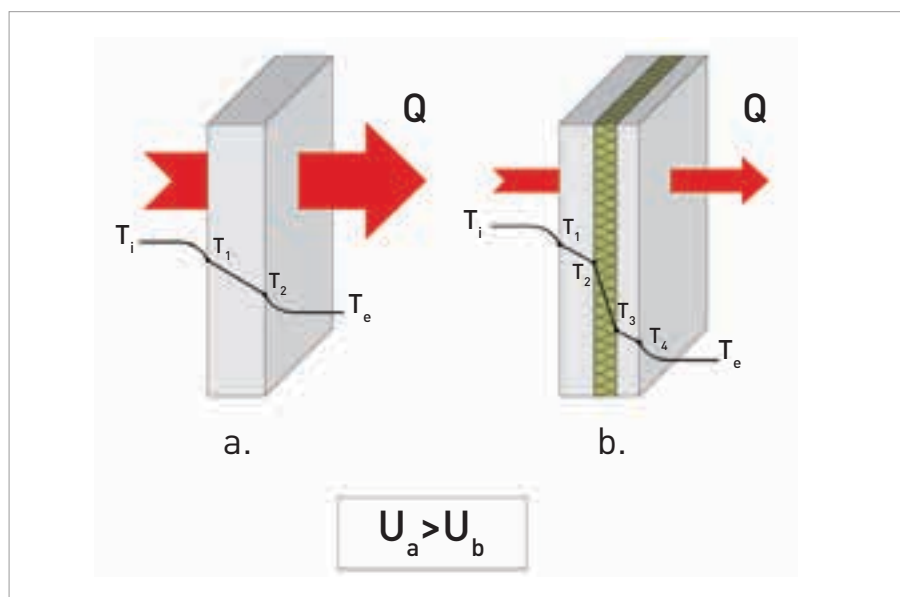


Figura 4.1 - Flusso di calore attraverso un elemento di chiusura e andamento delle temperature al variare della trasmittanza

a. Parete non isolata

b. Parete isolata

Il flusso di calore che attraversa un elemento di chiusura, in regime stazionario, dipende dalla trasmittanza dello stesso, dalla differenza tra la temperatura esterna e quella interna e dalla superficie dell'elemento.

La trasmittanza termica risulta dunque essere legata alle caratteristiche dei materiali che costituiscono la struttura e alle condizioni di scambio termico limitare. Attraverso questo parametro è possibile stimare quantitativamente il flusso di calore (di tipo conduttivo) che interessa l'elemento, in condizioni stazionarie [figure 4.1 e 4.2]:

$$Q = A \cdot U \cdot \Delta T \text{ in [W]},$$

in cui:

$\Delta T = T_e - T_i$ è la differenza tra la temperatura esterna e la temperatura interna.

Per come è definito, Q è negativo quando il calore è ceduto all'ambiente esterno e positivo in caso di guadagno di calore.

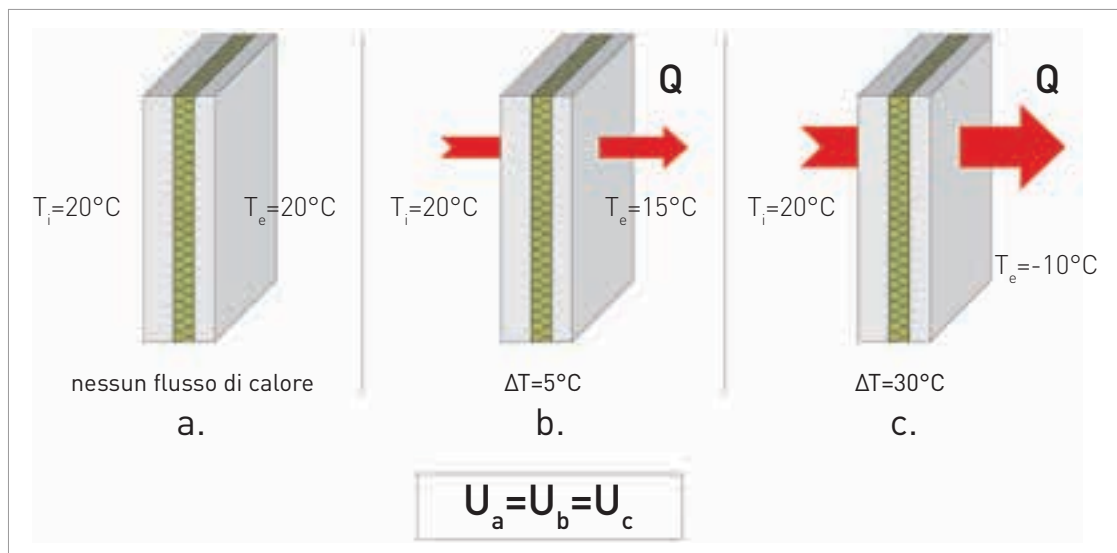


Figura 4.2 - Flusso di calore attraverso un elemento di chiusura al variare della differenza di temperatura tra i due ambienti

- a. $\Delta T = 0^\circ\text{C}$
- b. $\Delta T = 5^\circ\text{C}$
- c. $\Delta T = 30^\circ\text{C}$

4.2 Comportamento nella stagione estiva

Al fine di limitare il fabbisogno per la climatizzazione estiva e di contenere la temperatura interna degli ambienti (esigenza che trova peraltro riscontro anche nelle disposizioni legislative attualmente in vigore), è opportuno verificare il comportamento "inerziale" della chiusura.

Durante la stagione estiva, inoltre, il calcolo degli apporti solari sulla parte opaca (che di solito viene trascurato nei calcoli in stagione invernale) può assumere un significativo contributo nel bilancio energetico.

4.2.1 L'inerzia della chiusura

Il comportamento inerziale² delle strutture che definiscono l'ambiente in esame può essere verificato attraverso la valutazione di due parametri: il fattore di attenuazione f_s ed il coefficiente di sfasamento Φ .

²Il riferimento normativo per il calcolo di questi fattori è la UNI EN ISO 13786:200

- Il fattore di attenuazione f_a è uguale al rapporto fra il massimo flusso della parete capacitiva ed il massimo flusso della parete a massa termica nulla; esso dunque qualifica la riduzione di ampiezza dell'onda termica nel passaggio dall'esterno all'interno dell'ambiente attraverso la struttura in esame (Figura 4.3).
- Il coefficiente di sfasamento Φ (espresso in ore) rappresenta il ritardo temporale del picco di flusso termico della parete capacitiva rispetto a quello istantaneo, nel passaggio dall'esterno all'interno dell'ambiente attraverso la struttura in esame (Figura 4.3).

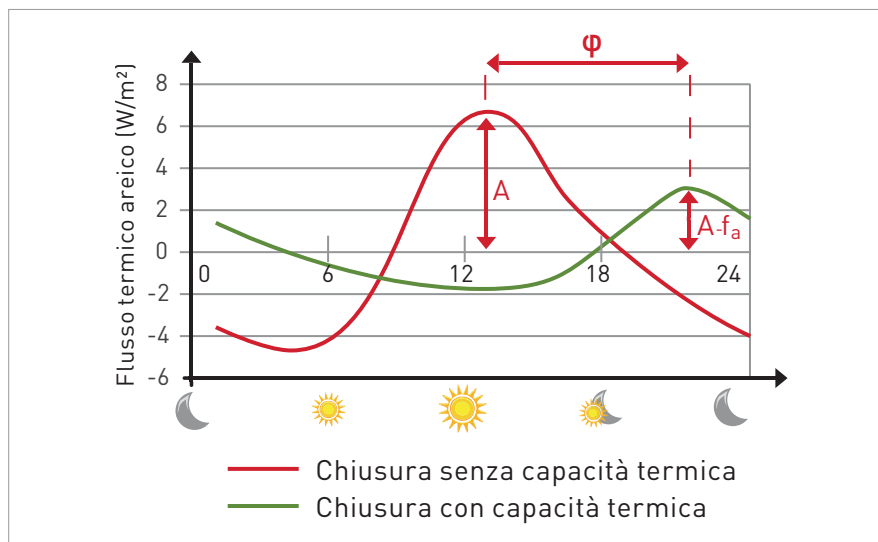


Figura 4.3 - Fattore di attenuazione e sfasamento

La stima della trasmissione degli apporti solari da parte degli elementi opachi si basa sul concetto di temperatura aria-sole, ovvero una temperatura "fittizia" che nella sua determinazione trascura qualunque flusso di calore dalla superficie verso l'interno. Questa temperatura non rappresenta la temperatura superficiale reale dell'elemento ma è una temperatura ideale.

Il flusso di calore areico che interessa una chiusura in un determinato istante è dato dalla seguente relazione:

$$Q = U \cdot (T_{e,m} - TT_i) - f_a U (T_{e,m} - TT_{e,t-\Phi}) \quad \text{in [W/m}^2\text{]}$$

dove:

- $T_{e,m}$ è la temperatura fittizia media giornaliera (detta temperatura aria-sole);
- TT_i è la temperatura dell'aria interna;
- $TT_{e,t-\Phi}$ è la temperatura fittizia, all'ora $t-\Phi$;
- f_a è il fattore di attenuazione (dipendente dalle caratteristiche dei materiali che costituiscono la stratigrafia della struttura);
- Φ è lo sfasamento (dipendente dalle caratteristiche dei materiali che costituiscono la stratigrafia della struttura);

in cui la temperatura "fittizia" è data dalla relazione:

$$T_{e,t} = T_{ae,t} + \alpha (I_t / h_e) - \epsilon (\Delta R / h_e)$$

dove:

- $T_{ae,t}$ è la temperatura dell'aria esterna;
- α è il coefficiente di assorbimento della parete;
- I_t è l'irradianza solare [W/m^2];
- h_e è il coefficiente liminare esterno;
- ϵ è l'emissività emisferica della superficie;
- ΔR è la differenza tra la radiazione a onda lunga incidente sulla superficie dal cielo e dall'intorno e la radiazione emessa da un corpo nero alla temperatura dell'aria esterna [W/m^2]. Questo valore dipende dalle condizioni di copertura della volta celeste (un appropriato valore di ΔR è circa $63 W/m^2$)³.

Nel caso delle coperture, infatti, nell'equazione della temperatura aria-sole va incluso anche un termine che tiene conto dell'emissione di calore che avviene per irraggiamento.

Dalle formule appare evidente il ruolo dell'inerzia termica delle chiusure, che è quindi da intendersi come la capacità delle chiusure dell'involucro edilizio di governare (nel tempo) le pulsazioni del flusso termico entrante.

È in quest'ottica che va letto il valore del coefficiente di sfasamento Φ , che, per le nostre latitudini, si dovrebbe attestare su valori minimi intorno alle 9 ore, così come il valore del fattore di attenuazione, che dovrebbe essere preferibilmente il più basso possibile.

4.2.2 L'inerzia dell'ambiente

A seguito dei flussi termici entranti attraverso le chiusure, le pulsazioni termiche risultanti in ambiente possono essere governate dalla presenza delle masse interne a contatto con l'aria dell'ambiente. È proprio questo il ruolo dell'inerzia ambientale (si è soliti riferirsi all'indice di inerzia ambientale).

Gli effetti dovuti all'inerzia termica degli ambienti sono, in generale, riconducibili a:

- moderazione delle fluttuazioni di temperatura all'interno dell'ambiente dovute alle variazioni cicliche dei flussi termici entranti;
- spostamento temporale dei picchi di domanda dell'impianto di climatizzazione in ore in cui l'uso degli ambienti provoca condizioni di carico meno gravose, grazie all'accumulo di energia nella massa dell'edificio.

Nei climi caldi, o comunque nella stagione estiva, le strutture dotate di elevata capacità termica accumulano calore durante il giorno e lo rilasciano durante le ore notturne.

Questo si traduce sostanzialmente in una riduzione della richiesta di energia ed in un aumento delle condizioni di comfort termico, poiché la temperatura superficiale (e quindi quella radiante) risulta essere minore di quella dell'aria nei momenti di picco giornalieri.

Nei climi più freddi, o comunque nella stagione invernale, la capacità termica risulta in grado di immagazzinare il calore proveniente dalla radiazione solare giornaliera, cedendola nelle ore serali e notturne mitigando l'ambiente.

In conclusione, preme sottolineare come, riferendosi al comportamento ambientale, la capacità termica che contribuisce sia soprattutto quella che compete alle superfici interne a contatto con l'aria dell'ambiente.

Il flusso di calore entrante Q è legato alla trasmittanza U della chiusura. Risulta in ogni caso più efficace agire direttamente sull'isolamento qualora non sia possibile sfruttare la capacità termica.

³ Cfr. Mark Owen, 2005 ASHRAE Handbook Fundamentals.

La posizione in cui lo strato isolante viene inserito nella chiusura ha ripercussioni sulla dinamica dello scambio termico, sebbene in regime stazionario esso risulti essere ininfluente.

Posizionando l'isolamento sul lato interno di una chiusura se ne separa la massa termica dal contatto diretto con l'ambiente. In questo modo esso sarà portato a regime molto più rapidamente da un eventuale impianto di climatizzazione, così come si allontanerà velocemente dalle condizioni di equilibrio raggiunte una volta che l'impianto sarà spento.

Al contrario, se l'isolamento termico viene posto sul lato esterno di una chiusura, la massa termica della stessa viene inglobata in quella dell'ambiente. In questo modo le fluttuazioni delle temperature sia dell'aria, sia superficiali, risultano essere mitigate. Sotto queste condizioni l'ambiente impiega più tempo a riscaldarsi e raffreddarsi rispetto a quanto avveniva nel caso precedente.

4.3 Effetti della ventilazione

La ventilazione permette il miglioramento del funzionamento dinamico delle soluzioni di copertura ed in particolare è consigliata quando si ha la necessità o l'obiettivo di:

- asportare parte dell'energia termica dovuta all'irradiazione solare e incidente sulla copertura. Tale effetto risulta essere particolarmente benefico durante la stagione estiva;
- trasferire verso l'esterno il vapore acqueo contenuto all'interno degli ambienti sottostanti la copertura. In questo modo è possibile evitarne la condensa e il ristagno in corrispondenza dell'isolante o della struttura, determinando così una maggiore durata ed efficienza del componente edilizio. Tale effetto risulta essere particolarmente benefico durante la stagione invernale.

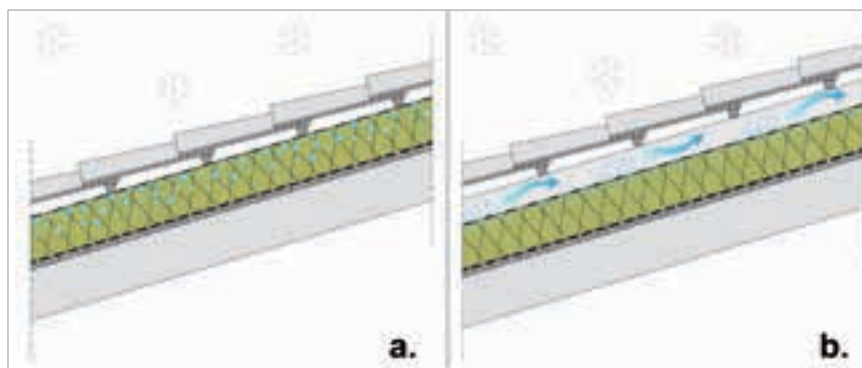


Figura 4.4 - Effetti della ventilazione nella stagione invernale: allontanamento del vapore acqueo

a. Copertura non ventilata

b. Copertura ventilata

Una copertura viene considerata ventilata quando nella successione degli strati funzionali della stessa viene inserito uno strato costituito da una intercapedine di ventilazione collocata tra l'isolamento termico e il rivestimento di copertura. In questo modo è possibile sfruttare la massa termica dell'elemento strutturale, oltre a proteggerlo dall'esposizione ad elevati sbalzi di temperatura. Tale intercapedine deve avere un adeguato spessore in rapporto allo sviluppo complessivo della copertura ed essere messa in diretto contatto con l'ambiente esterno. Particolare riguardo va posto alle stratigrafie limitrofe all'intercapedine stessa, che non dovranno avere punti di contatto tra loro.

Non viene considerato come tetto ventilato una copertura realizzata con sistemi discontinui e in cui sia presente solamente la microventilazione sottotegola effettuata con listelli distanziatori per le tegole di almeno 2 cm di spessore (UNI 8627). Nel caso di irraggiamento medio ed elevato la microventilazione risulta essere insufficiente per l'asportazione dell'energia termica incidente sulla copertura, mentre risulta essere ancora efficace per lo smaltimento dell'umidità in eccesso proveniente dagli ambienti riscaldati.

La ventilazione in copertura riduce l'assorbimento dell'energia termica incidente e l'accumulo di vapore acqueo negli strati.

4.3.1 Il funzionamento delle coperture ventilate: asportazione dei carichi termici

Nel caso la ventilazione venga utilizzata per la riduzione dei carichi estivi agenti sulla copertura e trasmessi all'ambiente interno è possibile ottenere una riduzione degli stessi compresa tra il 20 e il 40 %, in relazione rispettivamente allo spessore maggiore o minore di isolamento realizzato. L'asportazione dei carichi risulta essere inoltre direttamente correlata allo spessore di intercapedine ventilata considerata. Di norma si nota come la capacità di asportare l'energia incidente cresce all'aumentare dello spessore dell'intercapedine ventilante fino ad assestarsi intorno a un valore costante al di sopra dei 15 cm di spessore. Si considera come ottimale un valore di almeno 7 cm di spessore.

Parlando di spessore di intercapedine ci si riferisce all'altezza netta della stessa. Qualsiasi interruzione o variazione della forma dovuta alla presenza di sottostrutture di supporto lignee o metalliche del rivestimento di copertura o da eventuali interruzioni realizzate per l'inserimento di serramenti o lucernari, aumentando le perdite di carico e riducendo la sezione dell'intercapedine, peggiora il meccanismo di funzionamento della stessa.

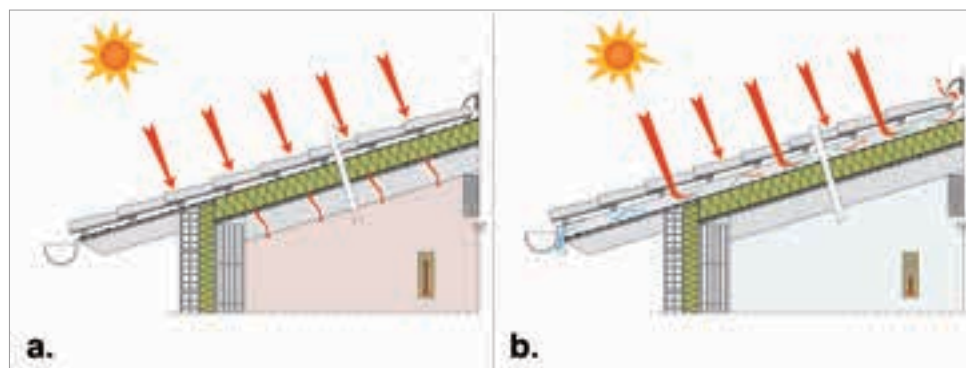


Figura 4.5 - Effetti della ventilazione nella stagione estiva: asportazione dell'energia termica dovuta alla radiazione solare
a. Copertura non ventilata
b. Copertura ventilata

Le superfici di ventilazione devono avere dimensioni adeguate, non presentare ostruzioni, soluzioni di continuità e variazioni di geometria o superficie.

La portata d'aria attraverso l'intercapedine, che si traduce nell'effetto benefico di riduzione dei carichi termici estivi, viene a dipendere, oltre che dalle dimensioni e forma dell'intercapedine, anche dalla velocità dell'aria all'interno della stessa. Tale velocità dipende principalmente da due fattori:

- dai gradienti positivi di temperatura dovuti all'irraggiamento solare sulla copertura o dal calore proveniente dall'ambiente interno;
- dalla pressione cinetica del vento e dalle sue relative variazioni in corrispondenza di aperture di entrata e uscita lungo tutto lo sviluppo della copertura.

Se l'aria contenuta nell'intercapedine ha una temperatura maggiore rispetto alla temperatura dell'aria dell'ambiente circostante, si crea all'interno dell'intercapedine una spinta ascensionale termica direttamente proporzionale all'inclinazione della copertura. Maggiore sarà la pendenza della stessa, maggiore sarà la spinta. La spinta ascensionale termica viene considerata nulla in presenza di coperture piane.

La forzante termica non risulta tuttavia essere il meccanismo preponderante per la movimentazione dell'aria nelle intercapedini ventilate del tetto, dato che un grande contributo è dovuto dalla spinta cinetica del vento, specialmente durante i periodi invernali, in cui l'irradiazione solare risulta essere molto bassa.

La pressione del vento si distribuisce in maniera non uniforme lungo la superficie irregolare dell'edificio e della copertura. A zone a maggiore pressione si contrapporranno zone soggette a minore pressione e in ogni caso si avrà costantemente una dipendenza diretta dalla direzione e dalla intensità del vento.

A causa di queste variabilità delle condizioni al contorno non è immediato definire aprioristicamente l'eventuale localizzazione di una efficace apertura d'ingresso e una di uscita dell'aria in circolazione nell'intercapedine della copertura. Di norma vengono localizzate alla base e al colmo del tetto.

Per il tiraggio naturale del tetto è importante la dimensione delle aperture in corrispondenza delle gronde, per garantire un elevato apporto d'aria specialmente in coperture che presentano basse infiltrazioni d'aria in corrispondenza dei giunti tra elementi di rivestimento. Allo stesso modo è importante controllare il nodo tecnologico del colmo di copertura, che normalmente è la zona in cui viene garantita la fuoriuscita dell'aria del tetto.

Per strutture e geometrie complesse, in termini di superfici e di canali, la circolazione dell'aria all'interno della copertura potrebbe essere notevolmente ostacolata. Potrebbe risultare utile in questi casi eseguire un'analisi puntuale e il più possibile dettagliata della circolazione dell'aria. A tal fine ci si può servire di simulazioni fluidodinamiche del comportamento dell'intercapedine ventilata.

E' però doveroso ricordare che la non perfetta conoscenza della geometria del sistema, nonché l'incerta stima di coefficienti di attrito e di scambio termico delle superfici analizzate potrebbero vanificare il risultato di simulazioni anche particolarmente raffinate. Ogni copertura andrebbe considerata caso per caso, evitando di trasferire tipologie edilizie e tecnologie senza soffermarsi ad analizzare adeguatamente il contesto in cui si andrà ad operare.

4.3.2 Regole di buona progettazione

Al fine di garantire un efficiente funzionamento delle coperture ventilate risulta necessario effettuare un'adeguata progettazione dei componenti, tenendo conto in particolare di alcuni fattori e valori di riferimento. In particolare:

- per una copertura ventilata la sezione dell'intercapedine o del canale di ventilazione deve avere una superficie che varia tra un minimo di 400 cm² per ogni metro lineare di sviluppo della falda del tetto fino a un massimo di 800 cm² per ogni metro lineare di sviluppo della falda del tetto;
- per una copertura microventilata è necessario garantire una superficie di intercapedine di minimo 200 cm² per ogni metro lineare di sviluppo della falda del tetto;
- deve essere assicurata sulla copertura una adeguata sezione di ingresso dell'aria in corrispondenza della linea di gronda e di uscita in corrispondenza del colmo. Vanno quindi evitate eventuali ostruzioni;
- si deve garantire la migliore e maggiore pendenza possibile alla copertura;
- in inverno la ventilazione non risulta essere conveniente dal punto di vista del risparmio energetico dato che tende a ridurre la resistenza termica della superficie di copertura, ma anche a favorire il raffreddamento delle superfici a contatto con l'ambiente interno, aumentando conseguentemente le dispersioni. Sarebbe opportuno, in fase di progettazione e realizzazione, prevedere sistemi in grado di annullare la ventilazione invernale, garantendo solo un minimo di flusso necessario all'asportazione della condensa prodotta negli ambienti interni.

CAPITOLO 5

Fenomeni condensativi: aspetti di teoria e progettazione

Fra gli aspetti principali concernenti la salubrità degli ambienti (con riferimento al terzo requisito essenziale – Igiene, salute ed ambiente – della Direttiva Prodotti da Costruzione CPD 106/89 EC, sostituita dal 1 luglio 2013 dal Regolamento UE 305/2011) vi sono senza dubbio i fenomeni di condensazione interstiziale e condensazione superficiale, che hanno conseguenze anche sulla prestazione termica, sulla durabilità e sull'aspetto dei materiali e dei componenti edilizi. Storicamente questa tipologia di problemi si sviluppò con l'introduzione di tecnologie stratificate ed in conseguenza dell'incremento della tenuta all'aria dei serramenti esterni (con la crisi energetica degli anni '70).

5.1 Condensazione interstiziale e condensazione superficiale

In un componente edilizio posto fra due ambienti si ha condensazione interstiziale quando il vapore acqueo che lo attraversa condensa all'interfaccia fra due strati oppure all'interno dei pori dei materiali costituenti gli strati del componente edilizio stesso. Le forzanti sono la differenza di pressione e la differenza di temperatura – anche se quest'ultima in misura minore – fra i due ambienti (interno/esterno o interno/interno) separati dal componente edilizio considerato, mentre i parametri che intervengono nel regolare il fenomeno sono le resistenze termiche e le permeabilità al vapore di ogni strato.

Si ha invece condensazione superficiale, ovvero la formazione di condensa sulla superficie interna e/o esterna dei componenti edilizi, quando la temperatura superficiale scende al di sotto della temperatura di rugiada. Le forzanti sono quindi la temperatura e l'umidità relativa ambientali e della superficie interessata, mentre ad intervenire nella regolazione del fenomeno vi è anche la rugosità della superficie (quindi la sua capacità di adsorbire molecole di acqua).

In generale i punti critici per la formazione di condensazione sia superficiale che interstiziale sono in corrispondenza di ponti termici e di discontinuità delle proprietà igrotermiche. Luoghi preferenziali per la condensazione sulle superfici interne sono inoltre tutti i punti in cui è limitata la circolazione ed il ricambio dell'aria.

5.2 Effetti dei fenomeni condensativi

Gli effetti principali dei fenomeni condensativi riguardano lo sviluppo di condizioni favorevoli allo sviluppo di muffe, l'incremento della conducibilità termica dei materiali e la predisposizione allo sviluppo di processi di degrado dei materiali.

La condensazione superficiale può favorire la proliferazione di organismi biologici (muffe, funghi, ecc.), che possono generare condizioni insalubri, dare luogo a fenomeni di degrado (specie per il legno) e produrre condizioni di discomfort termoigrometrico. La formazione di un film di condensa sulla superficie di metalli non inossidabili favorisce inoltre processi di corrosione.

In caso di accumulo di acqua di condensa interstiziale negli strati isolanti, invece, si può avere un decadimento della resistenza termica. I prodotti isolanti hanno infatti bassa conducibilità termica in ragione della presenza nei loro pori – di ridotte dimensioni – di aria ferma che ha bassa conducibilità termica (da circa 0.0222 W/mK a - 20 °C a circa 0.0272 W/mK a + 50 °C).

L'acqua che si accumula nei pori (sostituendosi all'aria o ad altra miscela di gas) ha invece una conducibilità termica molto maggiore (pari a 0.61 W/mK a + 20°C e pari a 2.30 W/mK a - 20°C, quindi ghiaccio) e per questo motivo l'effettiva conducibilità globale dello strato (matrice solida più acqua, nei suoi stati di aggregazione, ed aria) risulta molto maggiore di quella di progetto.

Un altro effetto dell'accumulo di condensa interstiziale è il favorire processi di degrado dei materiali. In particolare nel caso di presenza di condensa negli strati esterni di un pannello isolante, sulla cui interfaccia esterna si abbiano temperature al di sotto dello zero si ha formazione di ghiaccio ed all'innalzarsi della temperatura (si tenga conto che con temperature nell'intorno di $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ l'acqua ghiaccia nei pori di qualunque dimensione) si hanno quindi cicli di gelo - disgelo che disgregano la matrice solida dell'isolante ed aumentano la dimensione dei pori.

Anche qualora non si abbia formazione di ghiaccio, l'acqua accumulata indebolisce meccanicamente i materiali, che risultano quindi maggiormente sensibili alle variazioni dimensionali dovute alle variazioni cicliche e giornaliere di temperatura. I cicli di condensazione interstiziale costituiscono inoltre un motivo di variazione del contenuto d'acqua e danno quindi luogo a variazioni dimensionali dovute all'umidità. La presenza, infine, di quantità rilevanti di acqua nei pori consente la migrazione di sali igroscopici e quindi lo sviluppo di fenomeni quali efflorescenze e cripto-efflorescenze.

5.3 Strumenti di valutazione e controllo del rischio di condensazione interstiziale e superficiale

I più noti metodi di valutazione del rischio di condensazione interstiziale sono quelli del tipo di Glaser (come in UNI EN ISO 13788), che considerando la diffusione del vapore acqueo (secondo la legge di Fick) indicano rischio di condensazione interstiziale quando la pressione parziale del vapore (ovvero la differenza di pressione fra i due ambienti separati dal componente edilizio) raggiunge la pressione di saturazione (ovvero la pressione, in funzione della temperatura a cui si trova l'interfaccia considerata, per la quale si ha saturazione della soluzione del vapore acqueo in aria e quindi condensa).

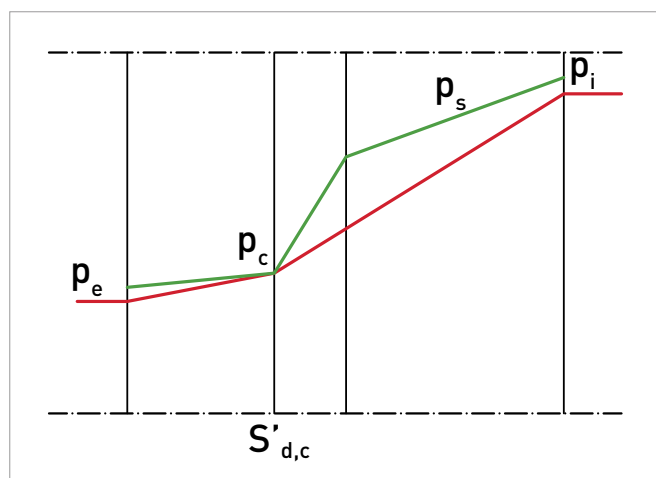


Figura 5.1 - Profilo delle pressioni parziali di vapore e delle pressioni di saturazione in caso di condensazione in una interfaccia

Graficamente si individua l'interfaccia in cui si verifica condensazione dove la linea della pressione parziale è tangente alla pressione di saturazione (Figura 5.1). La norma propone inoltre un metodo per calcolare se l'acqua condensata rievapora e fissa, per classi di materiali, quantità limite di condensa ammissibile alla fine del periodo di condensazione (ovvero la condensa formatasi al termine del periodo di riscaldamento dovrà essere evaporata prima dell'inizio della successiva stagione di riscaldamento).

Nella norma UNI EN ISO 13788 è inoltre proposto un metodo per la valutazione del rischio di condensazione superficiale, che consente di calcolare, in funzione di temperatura ed umidità relativa interna, la temperatura superficiale interna sotto cui è probabile la proliferazione di muffe.

Esistono modelli più avanzati (richiamati anche nella stessa norma), in genere alle differenze finite, che considerano come forzanti i dati climatici orari, per il calcolo del trasporto accoppiato di calore ed umidità, i quali permettono una valutazione più precisa dell'andamento del contenuto d'acqua nei componenti edilizi. Questi modelli di calcolo necessitano però di una rilevante quantità e precisione dei dati in ingresso (sia per quanto concerne i dati climatici che per le proprietà igrotermiche dei materiali) e sono attualmente diffusi solo in ambito di ricerca.

5.4 Limitazioni dei metodi normati semplificati

I metodi semplificati di valutazione del tipo di Glaser presentano tuttavia diverse limitazioni poiché trascurano molti aspetti del reale fenomeno fisico, di seguito discussi.

5.4.1 Approssimazioni del modello e dei meccanismi di trasporto

Prima di tutto viene considerato lo scambio termico in regime stazionario e solo un meccanismo di trasporto per l'umidità, ovvero la diffusione del vapore, mentre fra i meccanismi di trasporto rilevanti nei mezzi porosi vi sono anche la conduzione per capillarità, la diffusione superficiale (l'acqua adsorbita sulla superficie diffonde negli strati interni) ed infine, anche se in casi particolari, la diffusione in polimeri (le molecole d'acqua diffondono all'interno della catena di macromolecole di polimeri utilizzati, ad esempio, per barriere al vapore e causano rigonfiamenti).

A queste forzanti si aggiunge naturalmente anche la forza di gravità, che in alcuni casi (specialmente per quanto riguarda le coperture) può fornire un contributo niente affatto trascurabile. Il trasporto non è monodimensionale ed i meccanismi che lo governano sono combinati fra loro; perciò l'acqua non rimane confinata sull'interfaccia in cui si è verificata la condensa, ma è soggetta a trasporto in fase liquida. Nel caso delle coperture, ad esempio, ciò significa che se si verifica condensazione interstiziale in uno strato al di sopra di uno strato isolante non protetto, l'acqua tenderà a penetrare nell'isolante in ragione della diffusione superficiale, dell'assorbimento capillare e della gravità.

5.4.2 Approssimazioni delle forzanti

I metodi normati considerano inoltre dati climatici medi mensili e non prendono in esame lo scambio termico radiativo, assumendo quindi in regime invernale temperature della superficie esterna molto maggiori di quelle reali in esercizio (che in condizioni invernali notturne di cielo sereno possono risultare anche di diversi gradi al di sotto della temperatura dell'aria esterna) e molto minori in regime estivo. Ciò può produrre una sottostima del rischio di condensazione, specie nel caso delle coperture, che hanno elevati fattori di vista del cielo (in maniera inversamente proporzionale alla pendenza della falda) ed una sovrastima del tempo di rievaporazione. Il metodo normato non tiene inoltre conto delle infiltrazioni d'aria e della ventilazione e nel caso delle coperture, pertanto, non consente di valutare il contributo fornito da strati di micro-ventilazione.

5.4.3 Approssimazione dei dati di input sulle proprietà dei materiali

Non è considerata inoltre la preesistenza di acqua (acqua iniziale, acqua adsorbita all'interno dei pori per equilibrio igroscopico ed eventuali infiltrazioni), che altera sia le proprietà di resistenza alla diffusione del vapore (che decresce all'aumentare dell'umidità relativa nei pori) che la conducibilità termica. Non sono infine valutati i contributi del calore latente delle transizioni di fase. Perciò il calcolo del profilo di temperatura, in funzione del quale sono calcolate le pressioni di saturazione, risulta fortemente approssimato (in alcuni casi l'errore è consistente).

5.5 Spunti progettuali

Si è visto dunque come calcolare con precisione la formazione di condensa e la sua posizione all'interno di un componente edilizio risulti estremamente complesso, ma se fra gli scopi della progettazione vi è l'evitare la presenza di acqua all'interno dei componenti edilizi, non ci si può limitare a considerare l'acqua dovuta ai fenomeni condensativi.

Occorre pertanto, prima di tutto, garantire la tenuta all'acqua (anche limitate infiltrazioni, come discusso, possono alterare le proprietà igrotermiche) e controllare il contenuto d'acqua iniziale ovvero sia l'acqua inizialmente contenuta nei materiali utilizzati per la realizzazione del componente edilizio (soprattutto l'acqua adsorbita per igroscopia ed assorbita durante lo stoccaggio in cantiere), sia l'acqua di costruzione (prediligendo quindi le tecniche e le tecnologie che consentono di limitarla), sia l'accumulo di acqua durante la posa.

Per controllare i rischi di condensazione, quando l'apporto di acqua da altre fonti è stato governato, è opportuno agire sia sulla ventilazione degli ambienti interni (garantendo i ricambi d'aria e quindi il controllo dell'umidità relativa interna) e delle intercapedini sottotetto (per evitare il raggiungimento di elevati valori di umi-

dità relativa dell'aria esterna rispetto agli strati di isolamento), sia sulla scelta dei materiali, prediligendo una disposizione di strati avente resistenza alla diffusione del vapore decrescente dall'interno verso l'esterno ed effettuando un'attenta valutazione dell'utilizzo di uno strato di barriera al vapore, considerando soprattutto i dettagli costruttivi.

Se si introduce un freno o una barriera al vapore, infatti, ne va garantita innanzitutto la continuità, che risulta peraltro fortemente dipendente dalla posa in opera. Bisogna inoltre considerare se la riduzione o il totale impedimento della diffusione del vapore possa avere conseguenze sugli strati o sugli elementi interni (ad esempio rasature a gesso o elementi metallici). Una barriera al vapore deve invece essere necessariamente prevista all'intradosso di uno strato isolante, qualora sopra di questo sia disposta una membrana impermeabile.

Se si introduce uno strato di micro-ventilazione sottotetto può risultare opportuno disporre sopra l'isolante uno strato traspirante impermeabile all'acqua, poiché occorre fare in modo che il vapore acqueo permeato non condensi sulla superficie esterna dell'isolante e comunque, nel caso di eventuale condensa superficiale, occorre evitare che l'acqua allo stato liquido possa essere adsorbita e permeare all'interno dell'isolante (per diffusione superficiale, assorbimento capillare e gravità, come discusso sopra).

In generale è preferibile evitare un isolamento dall'interno (a meno di esigenze particolari come nei casi di recupero), visto che la condensazione interstiziale sarebbe favorita (essendo minore la pressione di saturazione poiché a temperature inferiori l'aria può contenere una minore quantità di acqua) e risulterebbe estremamente difficile garantire la continuità di una barriera al vapore in corrispondenza dei nodi costruttivi. È inoltre consigliabile introdurre intercapedini d'aria all'estradosso dell'isolante.

Un altro importante aspetto da governare è, infine, la tenuta all'aria dell'involucro, poiché in presenza di rilevanti infiltrazioni ed exfiltrazioni l'umidità relativa interna risulta difficile da controllare. Appare quindi chiaro che, per evitare fenomeni di condensa (interstiziale e superficiale), occorre curare la progettazione e la realizzazione dell'organismo edilizio nel suo insieme.

In sintesi si può affermare che assicurare condizioni di comfort per l'utenza significa anche garantire "condizioni di comfort per l'edificio", migliorandone il comportamento nel tempo e le prestazioni globali.

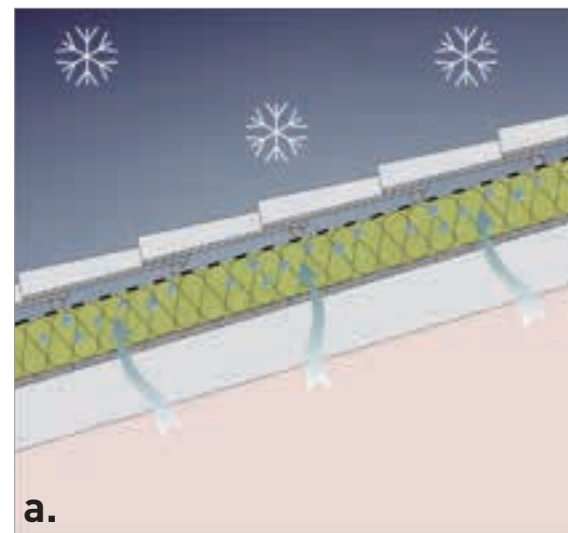


Figura 5.2 - Patologia condensativa indotta dalla mancanza di barriera al vapore

CAPITOLO 6

Tenuta all'aria

La tenuta all'aria o impermeabilità all'aria dei sistemi di copertura è un aspetto spesso trascurato che risulta essere critico per la qualità dei componenti edilizi poiché, come nel caso della tenuta all'acqua o del controllo dei fenomeni condensativi, se non è garantita, vengono compromesse molte altre prestazioni, come l'isolamento termico o l'isolamento acustico ai rumori aerei. Sebbene ottenere una perfetta tenuta all'aria risulti praticamente impossibile, è necessario controllare con la massima attenzione questo aspetto in ragione soprattutto delle maggiori richieste in termini di prestazione energetica dell'edificio.

6.1 Introduzione al problema: forzanti, punti critici e cause di mancanza di tenuta all'aria

La mancanza di tenuta all'aria consiste nella permeazione di aria in maniera non controllata attraverso l'involucro, che si divide in infiltrazioni (verso l'interno) ed exfiltrazioni (verso l'esterno).

La forzante del fenomeno è sempre una differenza di pressione prodotta dal vento, da un gradiente di temperatura oppure da sistemi di ventilazione meccanica.

La permeazione di aria avviene generalmente in corrispondenza di passaggi impiantistici, di nodi costruttivi, di punti di giunzione fra elementi in uno stesso strato, di fessure, oppure attraverso materiali molto permeabili all'aria. In particolare, i materiali isolanti a bassa densità non sono autonomamente in grado di resistere ad un flusso di aria in pressione, che, attraversandoli, ne compromette notevolmente la prestazione termica. Una delle caratteristiche delle crisi della tenuta all'aria è che il punto di ingresso ed il punto di uscita dei flussi di aria possono essere molto distanti e quindi possono avere influenza su più componenti edilizi, su unità ambientali o sull'intero edificio.

In generale si può dire che i principali imputati di una inadeguata tenuta all'aria siano anche in questo caso la progettazione dei dettagli costruttivi e soprattutto la posa in opera. Ad influire inoltre negativamente sulla tenuta all'aria vi è la crisi di interfacce ed elementi di tenuta (fissaggi meccanici, saldature di membrane, ecc.). In particolare nei punti di giunzione e nei nodi costruttivi risultano influenti le variazioni dimensionali dei materiali dovute a variazione delle condizioni igrotermiche (in particolare in inverno si ha una contrazione e quindi vi è la possibilità che si manifestino fessure non previste).

6.2 Conseguenze di una non efficace tenuta all'aria

Una non efficace e non efficiente tenuta all'aria, come accennato, può avere diverse conseguenze, fra le quali si citano:

- conseguenze sul comportamento energetico dell'edificio – le infiltrazioni e le exfiltrazioni producono un carico termico da ventilazione non controllata ed influiscono sul bilancio energetico dell'edificio, sia in regime invernale che in regime estivo;
- sono favoriti i fenomeni condensativi – in regime invernale le infiltrazioni di aria fredda all'interno degli ambienti abbassano la temperatura delle superfici nell'intorno della permeazione e favoriscono pertanto la condensazione superficiale. Se invece l'infiltrazione interessa strati interni ai componenti edilizi, è favorita la condensazione interstiziale. In generale le permeazioni di aria comportano una maggiore difficoltà di controllo dell'umidità relativa ambientale ed i flussi di aria sono un modo di trasporto dell'umidità molto più rilevante del meccanismo di diffusione del vapore;
- conseguenze sulle condizioni di comfort degli ambienti – in ragione sia di spifferi sia di variazioni non controllate della temperatura e di umidità relativa, si può avere un peggioramento delle condizioni di comfort termo-igrometrico;
- ingresso e trasporto di polveri, sporco ed odori sgradevoli – le polveri trasportate lasciano segni in prossimità dei punti di permeazione;

- limitazioni del potere fonoisolante – discontinuità consistenti della tenuta all'aria possono dare luogo anche alla compromissione dell'isolamento acustico ai rumori aerei;
- distacchi – flussi di aria in pressione in posizioni non previste favoriscono distacchi di parti ed interfacce non dimensionate per resistere a sollecitazioni meccaniche, come ad esempio pannelli o materassini isolanti incollati in intercapedine.

6.3 Misura della tenuta all'aria

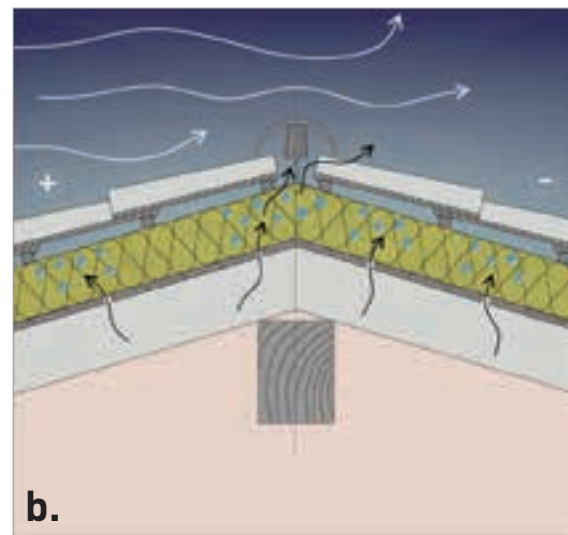
A livello europeo esistono sostanzialmente due metodi di misura della tenuta all'aria: un metodo di prova in laboratorio ed uno per prove in situ.

La norma EN 12114 presenta un metodo di prova per la misura della permeabilità all'aria di soli componenti edilizi (non di unità ambientali o edifici) che vengono sottoposti in laboratorio a differenze positive o negative di pressione statica.

La norma UNI EN 13829 (che richiama la norma ISO 9972) invece indica un metodo di prova in situ della permeabilità all'aria di edifici o di unità ambientali mediante pressurizzazione o depressurizzazione statica, che può essere utilizzato per l'individuazione di infiltrazioni ed exfiltrazioni. Questo metodo non è applicabile a singoli componenti edilizi.

Esiste infine un terzo metodo di prova in laboratorio (ISO 6859) specifico per elementi di giunzione: ciò sottolinea l'importanza della continuità della tenuta.

Figura 6.1 - Patologia condensativa indotta dalla scarsa tenuta all'aria. I flussi d'aria calda e umida provenienti dall'ambiente interno attraversano la copertura dando luogo a fenomeni di condensa interstiziale



6.4 Spunti progettuali

Si è visto come le conseguenze di una non adeguata tenuta all'aria possano essere notevoli e le riparazioni risultino inoltre costose, sia in ragione della difficile localizzazione dei punti di discontinuità della tenuta (per l'individuazione può essere utilizzato il fumo, ma anche il deposito di polveri può essere un indicatore) sia poiché i punti di crisi possono essere difficilmente accessibili. Per questo motivo si comprende come essa sia una funzione critica (ovvero la sua crisi compromette lo svolgimento di molte altre funzioni da parte del componente edilizio interessato o dell'intero edificio) ed è preferibile che questa funzione non sia assegnata ad un unico strato, ma a più strati ed elementi (soprattutto curando sovrapposizioni e punti di giunzione), garantendo inoltre la durabilità dei materiali che la assicurano.

Per garantire la tenuta all'aria sono state proposte barriere all'aria, in analogia alle barriere al vapore, ed in molti casi proprio queste ultime possono essere utilizzate come strumento di controllo dei flussi di aria. Se una barriera al vapore viene utilizzata anche come barriera all'aria è importante che questa sia continua e siano previste sovrapposizioni e sigillature nei punti di raccordo ed agli estremi.

È però importante non assegnare tutto il carico di tenuta ad un solo elemento, ma curare anche le altre giustapposizioni di elementi: nel caso di sovrapposizione di più strati di pannelli isolanti è opportuno predisporre giunti sfalsati ed eventualmente nastrati e lo stesso nel caso di pannelli in cartongesso. Vanno curati particolarmente i dettagli costruttivi e predisposte sigillature in corrispondenza delle interfacce fra elementi edilizi ed impiantistici (tubazioni, camini, ecc.). L'aspetto però forse più influente e critico è la posa in opera: sia la scelta della manodopera sia i controlli in corso d'opera non devono essere trascurati.

CAPITOLO 7

Acustica e coperture

7.1 Requisiti acustici passivi e sottotetti

La normativa italiana, da ormai quasi venti anni, prescrive che le esigenze di comfort e protezione acustica negli ambienti confinati di vita e di lavoro siano considerate e rispettate anche attraverso il progetto dell'edificio che li ospita, fissando non più solamente dei livelli massimi di rumorosità misurabili all'interno di tali ambienti ma anche i "requisiti acustici passivi" che ciascun elemento di involucro deve soddisfare, compresi gli impianti ivi installati.

Il D.P.C.M. 05/12/1997, relativo ai requisiti acustici passivi degli edifici, è stato per anni sottovalutato da committenti, costruttori, amministrazioni pubbliche e progettisti; ma nei suoi confronti, in particolar modo nell'ultimo periodo, si è rivalutata la necessaria attenzione da parte dell'intero settore, soprattutto a seguito dell'emanazione di sentenze giudiziarie conclusesi con il risarcimento da parte del costruttore verso l'acquirente per un importo fino al 30% del prezzo di acquisto. Ogni anno in Italia si registra l'apertura di circa 500.000 vertenze giudiziarie legate al rumore.

Un punto debole del decreto è rappresentato dalla non contemplazione in modo esaustivo dell'elemento "copertura": viene infatti definito in modo generico il requisito acustico di "facciata". È però evidente che al fine di verificare e determinare il rispetto normativo previsto dalla legislazione vigente è necessario adottare idonee verifiche acustiche anche per le coperture, potendo essere considerate come "facciate" oblique e/o piane nei sottotetti abitabili.

Le coperture sono principalmente interessate dal requisito di isolamento ai rumori aerei¹.

I limiti previsti dal D.P.C.M. 05/12/1997 variano in relazione alla destinazione d'uso degli ambienti.

Destinazione d'uso	$D_{2m,nT,w}$
Ospedali, cliniche, case di cura	45
Residenza stabile o temporanea	40
Attività scolastiche (a tutti i livelli)	48
Uffici, attività commerciali, ricreative o di culto	42

Tabella 7.1 - Isolamento acustico minimo della chiusura esterna di un edificio (D.P.C.M. 05.12.97)

La serie di pedici associata all'espressione dell'isolamento acustico ($D_{2m,nT,w}$) indica che il livello sonoro esterno deve essere misurato convenzionalmente a due metri dalla facciata (pedice 2m), valutare la risposta complessiva (pesata) a tutte le frequenze (pedice W) ed essere normalizzato rispetto ad un valore standard del tempo di riverberazione dell'ambiente interno (pedice nT).

Nella maggior parte delle valutazioni la copertura viene trascurata; le verifiche di progetto si limitano ai piani intermedi e al piano terra relativamente ai collaudi, in quanto è più agevole realizzare la prova.

Vero è che la geometria della copertura, in alcuni casi, può renderla maggiormente "protetta", meno esposta all'inquinamento acustico dell'ambiente esterno, ma questo vantaggio è compensato dal fatto che l'estensione di tali elementi può risultare preponderante sul totale delle chiusure esterne dell'involucro: così come

¹ I sottotetti, essendo normalmente posizionati all'ultimo piano dell'edificio, sono tendenzialmente meno soggetti al rumore provocato dal traffico stradale rispetto agli appartamenti sottostanti. Molto importante è il tempo di riverberazione interno, requisito di difficile controllo per gli ambienti di grandi dimensioni e con scarsa capacità di assorbimento interno. Si tenga conto che il tempo di riverberazione influenza sia la privacy sia l'intelligibilità dei messaggi sonori e dovrebbe essere opportunamente controllato - indipendentemente dagli obblighi normativi - tutte le volte che tali esigenze siano fondamentali.

un sottotetto dovrebbe richiedere una maggiore attenzione circa l'isolamento termico, per compensare le maggiori dispersioni attraverso un'estesa superficie perimetrale, così anche dovrebbe richiedere una maggiore attenzione circa l'isolamento acustico.

L'isolamento acustico di un ambiente sottotetto dipende dal potere fonoisolante dei singoli componenti (opachi e trasparenti) che costituiscono la chiusura e dal tempo di riverbero complessivo che si realizza al suo interno.

Ricordiamo che il potere fonoisolante misura l'efficacia con cui un componente impedisce la trasmissione del suono tra i due ambienti che separa, viene solitamente indicato con la lettera R ed è definito come dieci volte il logaritmo del rapporto tra l'intensità sonora incidente $W_{i,e}$ e quella trasmessa $W_{t,i}$:

$$R(f) = 10 \cdot \log \frac{W_{i,e}}{W_{t,i}}$$

Le prestazioni acustiche variano fortemente al variare della frequenza considerata. Per poter offrire una valutazione immediata, viene usato l'indice R_w . Questo indice si ottiene "pesando", con una curva di riferimento standardizzata definita dalla norma UNI EN ISO 717-1 come quella riportata in figura 7.1, la curva sperimentale.

La curva di riferimento è adattata alla linea del potere fonoisolante di ogni frequenza in modo tale che la somma di tutti gli scarti sfavorevoli (cioè il numero di decibel per il quale il punto della spezzata di R cade al di sotto della curva di riferimento) deve essere più grande possibile ma non deve superare 32 dB. Il valore ottenuto, letto alla frequenza di 500 Hz della curva di riferimento, determina il potere fonoisolante R_w dell'elemento.

7.2 Isolamento acustico e potere fonoisolante composito

L'isolamento acustico D di un ambiente dipende principalmente dal potere fonoisolante di ogni elemento costituente la parte divisoria dell'ambiente stesso verso l'esterno, ma anche dall'assorbimento acustico all'interno di tale ambiente. Maggiore è tale assorbimento, maggiore è la dissipazione dell'energia associata al rumore e, quindi, minore il livello acustico che si determina al suo interno.

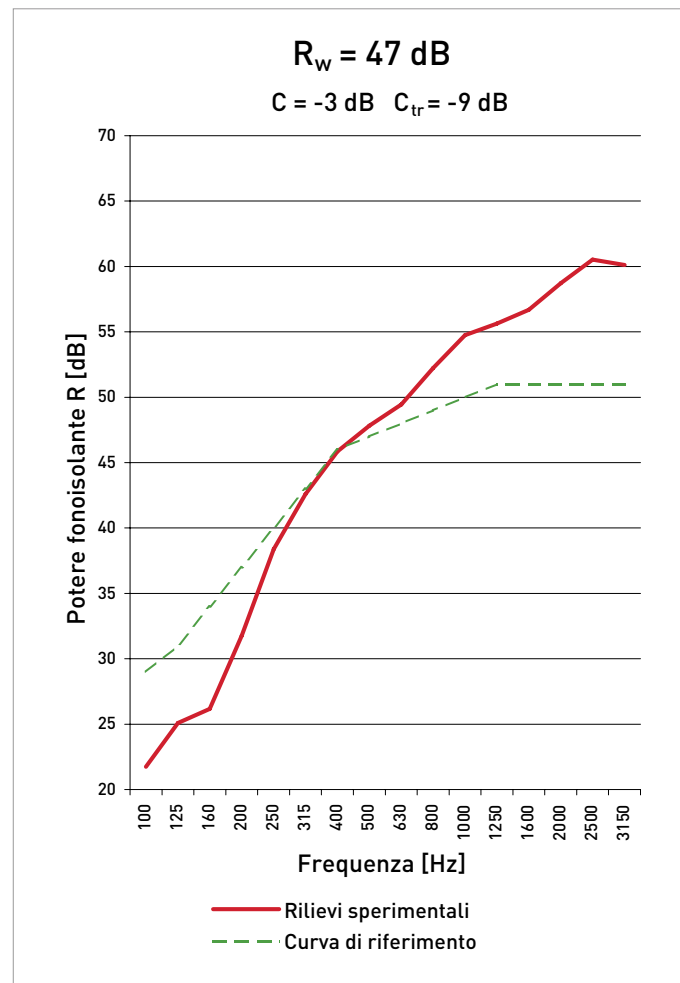


Figura 7.1 - Determinazione dell'indice di valutazione del potere fonoisolante, R_w

Per questa ragione, la valutazione dell'isolamento acustico di una chiusura viene ulteriormente "normalizzata" ad un valore standard dell'assorbimento o del tempo di riverberazione (T_0 , pari a 0,5 secondi).

Per poter definire l'isolamento acustico di facciata è pertanto necessario definire in prima istanza il potere fonoisolante apparente composto, attraverso la formula logaritmica che contempla la sommatoria dei poteri fonoisolanti di ogni singolo elemento rapportati alla superficie dell'elemento stesso:

$$R' = -10 \cdot \log \left(\sum_{i=1}^n \frac{S_i}{S} \cdot 10^{\frac{-R_i}{10}} + \frac{A_0}{S} \sum_{i=1}^p 10^{\frac{-D_{n_i}}{10}} \right) \text{ [dB]}$$

L'isolamento acustico di facciata si ottiene sommando al potere fonoisolante apparente composto dieci volte il logaritmo in base dieci del rapporto tra il tempo di riverbero dell'ambiente ricevente e quello di riferimento.

$$D_{nT} = R' + 10 \cdot \log \left(\frac{V}{6T_0S} \right) \text{ [dB]}$$

In figura 7.2 è riportato un grafico facilmente utilizzabile per il calcolo del potere fonoisolante di una chiusura composta da due elementi caratterizzati da estensione e potere fonoisolante, rispettivamente, S_1 e R_1 e S_2 e R_2 . L'incremento del potere fonoisolante composto ΔR , rispetto al valore più piccolo di questi ultimi, è espresso al variare della differenza tra i poteri fonoisolanti ($R_1 - R_2$) e del rapporto S_2 / S_1 .

Esso ci ricorda che anche parti caratterizzate da una piccola estensione (la linea verde verticale identifica il valore percentuale corrispondente alla frazione 1/8, per molti regolamenti il limite minimo dell'estensione dei serramenti rispetto alla superficie complessiva dell'involucro) possono influenzare pesantemente il valore del potere fonoisolante composto, che aumenta di pochi decibel, rispetto al potere fonoisolante dell'elemento meno "prestante", quando la porzione più estesa dell'involucro è caratterizzata da una prestazione acustica nettamente superiore.

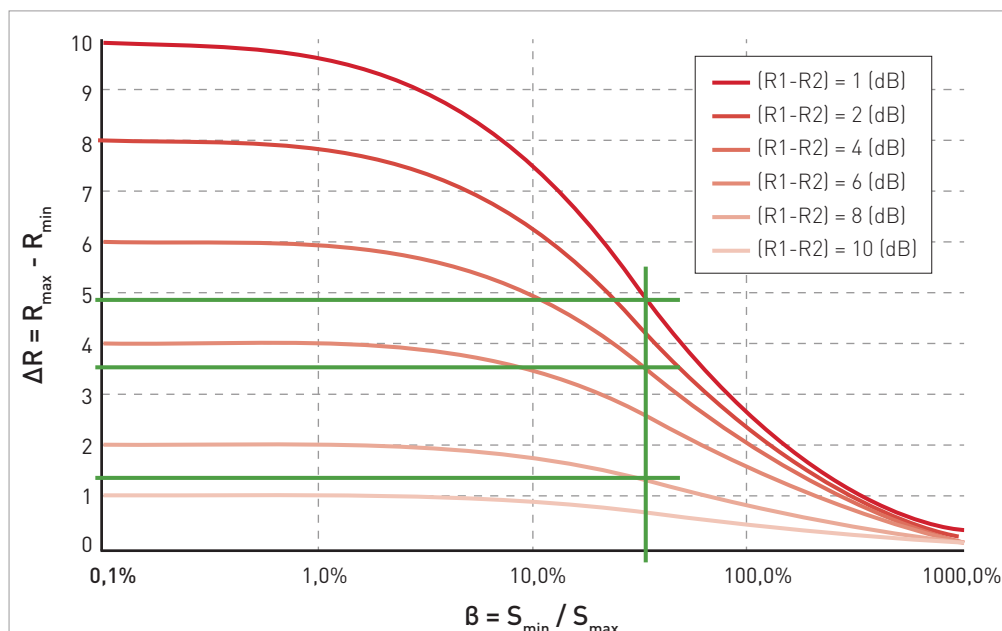


Figura 7.2 - Grafico per il calcolo del potere fonoisolante composto di una porzione di involucro realizzata con due componenti

7.3 I sistemi per l'isolamento ai rumori aerei

La trasmissione dei rumori aerei attraverso un elemento di chiusura e, conseguentemente, il suo potere fonoisolante, è una delle cose più difficili da prevedere con strumenti semplici, per due ordini di problemi. Il primo consiste nel fatto che le leggi fisiche da utilizzare nella modellazione della trasmissione delle vibrazioni nell'aria (intercapedini) non sono sempre riducibili a formule semplici; il secondo è rappresentato dal fatto che sia i modelli semplici che quelli complessi sono fortemente influenzati dal dettaglio della realizzazione della chiusura. La reale continuità degli strati assorbenti e di quelli di tenuta, così come minime discontinuità degli strati di separazione, realizzate per esempio per garantire la stabilità dell'elemento, possono costituire "ponti acustici" in grado di compromettere la prestazione prevista.

Le tecnologie di parete e copertura sono praticamente classificabili in tre categorie, dal punto di vista acustico:

- elementi singoli, realizzati con un unico elemento relativamente omogeneo, il cui potere fonoisolante è ragionevolmente prevedibile attraverso l'utilizzo della cosiddetta "legge di massa" (proporzionalità tra prestazione e logaritmo della massa superficiale). Ad esempio, appartengono a questa categoria, i solai laterocementizi;
- elementi doppi, doppie pannellature separate da una semplice intercapedine, come sistemi leggeri a secco, strutture in legno, cartongesso ecc.. Esistono alcune formule empiriche semplificate, che permettono valutazioni previsionali, mentre per strutture realizzate con laterizi si riscontrano differenze sostanziali con le prestazioni reali del tamponamento;
- elementi multistrato, il cui interesse consiste nel fatto che permettono prestazioni elevate contenendo la massa complessiva del divisorio e alternando strati massivi e a tenuta a strati fonoassorbenti ed elementi smorzanti di collegamento. In questo tipo di strutture, invece, non si è giunti alla definizione di formule che riescono a descriverne correttamente il comportamento.

Riportiamo di seguito alcune di queste formule "empiriche", tratte dal testo di R. Spagnolo, *Manuale di Acustica* (2001, UTET, Torino). Il valore della massa superficiale m dell'elemento è in kg/m^2 :

1. Pareti in laterizio

$$R_w = 16 \cdot \log m + 7 \quad (\text{pareti semplici in laterizio})$$

$$R_w = 16 \cdot \log m + 10 \quad (\text{pareti doppie in laterizio})$$

2. Solai in laterocemento

$$R_w = 23 \cdot \log m - 8$$

3. Pareti in cartongesso

Al variare dello spessore d dell'intercapedine riempita anche parzialmente da uno strato isolante fibroso di spessore e ;

$$R_w = 20 \cdot \log m + 10 \cdot \log d + e + 5 \quad (\text{con unico montante})$$

$$R_w = 20 \cdot \log m + 10 \cdot \log d + e + 10 \quad (\text{con montanti separati})$$

4. Vetrazioni

$$R_w = 12 \cdot \log m + 17 \quad (\text{vetri camera o lastre monolitiche non stratificate})$$

$$R_w = 12 \cdot \log m + 19 \quad (\text{vetri stratificati})$$

$$R_w = 12 \cdot \log m + 20 \quad (\text{vetri camera con una lastra stratificata})$$

$$R_w = 12 \cdot \log m + 22 \quad (\text{vetri camera con due lastre stratificate})$$

5. Serramenti

In pratica, se il peso a metro quadro del telaio è dello stesso ordine di grandezza della vetratura ($m_{\text{telaio}} \geq 70\% m_{\text{vetro}}$) ed esteso per meno del 25% della superficie complessiva ($S_{\text{telaio}} < 25\% S_{\text{serramento}}$), si considera lo stesso potere fonoisolante calcolato per il vetro decrementato di un valore che dipende dalla classe di tenuta all'aria:

$$\Delta R_w = - (0 \div 1) \quad (\text{serramenti di classe A3})$$

$$\Delta R_w = - (2 \div 4) \quad (\text{serramenti di classe A2})$$

$$\Delta R_w = - (5 \div 8) \quad (\text{serramenti di classe A1})$$

Gli elementi multistrato sono i sistemi di copertura più diffusi ma, per essi, la misura – in laboratorio o in opera – è spesso l'unica soluzione ragionevole per una verifica delle prestazioni di isolamento acustico. L'applicazione di formule empiriche fornisce valori non veritieri e penalizzanti rispetto al risultato effettivo ed è, quindi, fondamentale riferirsi a dati sperimentali. In questa pubblicazione sono riportati i risultati ottenuti in seguito allo svolgimento di prove acustiche effettuate su diverse tipologie di coperture (cfr. **scheda 1, 2, 4, 6, 8**).

È bene evidenziare che tali valori sono stati ricavati da prove in laboratorio e non da prove in opera. Possono pertanto essere adottati nella verifica delle prestazioni acustiche di un caso reale se la stratigrafia di cui è prevista la realizzazione corrisponde o presenta elementi migliorativi. Nella realizzazione in opera va considerata la conformità al modello sperimentale in termini di tenuta all'aria e di massa per unità di superficie, sia in sezione corrente (sequenza degli strati effettivamente realizzati) sia in corrispondenza dei dettagli.

In particolare, per quanto riguarda la copertura si deve porre specifica attenzione a tutti gli attraversamenti impiantistici (dove il lavoro del lattoniere, per garantire la tenuta all'acqua, può non essere sufficiente a garantire la tenuta all'aria) e ai punti singolari, dove la continuità dei materiali fonoisolanti può non essere garantita da una posa poco curata. Tali difetti hanno un'influenza sulle prestazioni di isolamento termico, ma una potenziale grande influenza su quelle di isolamento acustico, in quanto possono ridurre significativamente il potere fonoisolante delle coperture.

Un esempio. L'isolamento acustico di un locale sotto copertura.

Esempio di calcolo di una camera da letto abitabile con superficie di 14,0 mq e tetto in legno (il requisito minimo normativo da rispettare è $D_{2m,nT,w} = 40$ dB).

CARATTERISTICHE DELL' AMBIENTE IN OGGETTO:

■ superficie locali	S= 14.0 mq
■ dimensioni ambiente	3.50 x 4.00 m
■ lato prospiciente con l'esterno (larghezza)	L= 4.00 m
■ altezza minima ambiente abitabile	L= 1.50 m
■ altezza massima ambiente	L= 3.30 m
■ altezza media ponderata del locale	L= 2.40 m
■ superficie finestrata minima (1/8 Sup.)	S= 1.75 mq
■ superficie finestrata reale	S= 1.96 mq
■ potere fonoisolante muratura perimetrale	$R_w^{[2]} = 56$ dB
■ potere fonoisolante copertura	$R_w^{[3]} = 47$ dB
■ potere fonoisolante serramenti	$R_w^{[4]} = 39$ dB

Si precisa che, differentemente da quanto previsto dai regolamenti locali, al fine esemplificativo si posiziona l'intera superficie vetrata in copertura.

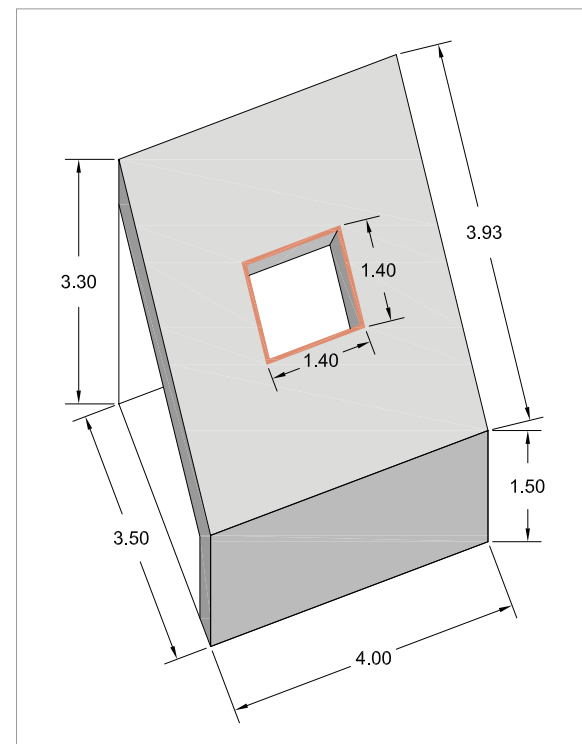


Figura 7.3 - Schema semplificato del locale preso in esame

² Potere fonoisolante di doppia parete definito da prova di laboratorio $R_w = 56$ dB [C= -1; Ctr= -4]:

- blocchi in laterizio alleggerito Alveolater 15x25x25 cm F/A=60% a fori orizzontali, montati sullo spessore di 15 cm con giunti verticali ed orizzontali continui in malta cementizia. Doppio intonaco di 1,5 cm per parte;
- pannelli ROCKWOOL 211, lana di roccia spessore 5 cm, densità 40 Kg/mc, a completo riempimento dell'intercapedine;
- tramezze in laterizio 8x25x25 cm F/A=60% a fori orizzontali, montate sullo spessore di 8 cm, con giunti verticali e orizzontali continui in malta cementizia. Intonaco sulla faccia esterna.

³ Potere fonoisolante definito da prova di laboratorio $R_w = 47$ dB [C= -3; Ctr= -9]:

- copertura in alluminio;
- pannello ROCKWOOL 211 sp. 4.00 cm, densità 40 Kg/mc;
- pannello ROCKWOOL 234 sp. 10.00 cm, densità 100 Kg/mc;
- freno al vapore;
- perlina in legno d'abete sp. 2.3 cm.

⁴ Serramento con:

- telaio in legno di abete;
- n. 2 guarnizioni di tenuta;
- verniciatura a base di acqua;
- permeabilità all'aria: classe A3;
- tenuta all'acqua: classe E4;
- resistenza al vento: classe V3;
- vetro camera stratificato semplice: 4.15.3+3.1.

Si riportano qui di seguito i dati riassuntivi di calcolo:

Dati	Unità di misura	Valore
Larghezza ambiente	m	4,00
Profondità	m	3,50
Altezza media ponderata	m	2,40
Superficie locale	m ²	14,00
Superficie facciata	m ²	21,72
Volume locale	m ³	33,60
Superficie muratura	m ²	6,00
R _w muratura	dB	56
Superficie copertura	m ²	13,76
R _w copertura	dB	47
Superficie finestrata	m ²	1,96
R _w serramenti	dB	39

Tabella 7.2 - Dati di progetto

Verifica di calcolo:

1) Determinazione del potere fonoisolante apparente R' attraverso la seguente formula:

$$R' = -10 \cdot \log \left(\sum_{i=1}^n \frac{S_i}{S} \cdot 10^{\frac{-R_i}{10}} + \frac{A_0}{S} \sum_{i=1}^p 10^{\frac{-D_{n_i}}{10}} \right)$$

2) Determinazione dell'indice di isolamento acustico di facciata mediante la seguente formula:

$$D_{nT} = R' + 10 \cdot \log \left(\frac{V}{6T_0S} \right)$$

$$D_{nT} = 43,2 \text{ dB} = 43 \text{ dB}$$

CAPITOLO 8

Protezione dagli incendi: aspetti di teoria e progettazione

Analogamente a quanto avviene per tutti i componenti dell'involucro edilizio, anche per le coperture occorre evitare, per quanto possibile, l'insorgere di un incendio, o quantomeno limitarne le conseguenze negative. Nel seguito della trattazione verranno descritte, oltre che le generalità del fenomeno, le misure e gli strumenti della prevenzione e della protezione incendi.

8.1 L'incendio

Si definisce incendio una combustione non controllata di materiali generici, siano essi solidi, liquidi o gas. La combustione è una reazione chimica che non può avvenire se non in presenza di elementi specifici:

- il comburente (tipicamente l'ossigeno);
- il combustibile;
- una fonte di calore.

È importante evidenziare che, perché la combustione avvenga, questi tre elementi devono essere disponibili contemporaneamente; difatti, al venir meno anche di uno solo, l'incendio si spegne.

Come verrà meglio approfondito nel seguito, questa particolarità permette ampi margini di intervento in termini di prevenzione dell'incendio stesso, operando, ad esempio, sulle caratteristiche dei materiali che potrebbero fungere da combustibile e riducendo le fonti di innesco; una valida prevenzione è infatti l'approccio più corretto per evitare, o almeno limitare, le conseguenze di un evento potenzialmente molto pericoloso e difficile da contenere una volta sviluppato qual è l'incendio.

Gli incendi vengono classificati secondo la natura del combustibile coinvolto:

- fuoco di materiali solidi;
- fuoco di liquidi infiammabili;
- fuoco di gas infiammabili;
- fuoco di metalli.

Questa suddivisione è fondamentale al fine di individuare l'agente estinguente corretto per ciascun tipo di incendio.

8.1.1 Dinamica dell'incendio

Le fasi che caratterizzano il fenomeno sono essenzialmente quattro, individuabili nel grafico alla pagina seguente (Figura 8.1).

Al momento iniziale, detto Ignizione, segue una fase di Propagazione, caratterizzata da un progressivo aumento delle temperature. Fino a questo momento lo spegnimento dell'incendio è possibile con buona probabilità di successo: non sono presenti ancora rischi gravi per i soccorritori, le persone possono facilmente abbandonare l'ambiente, i danni sono ancora piuttosto lievi.

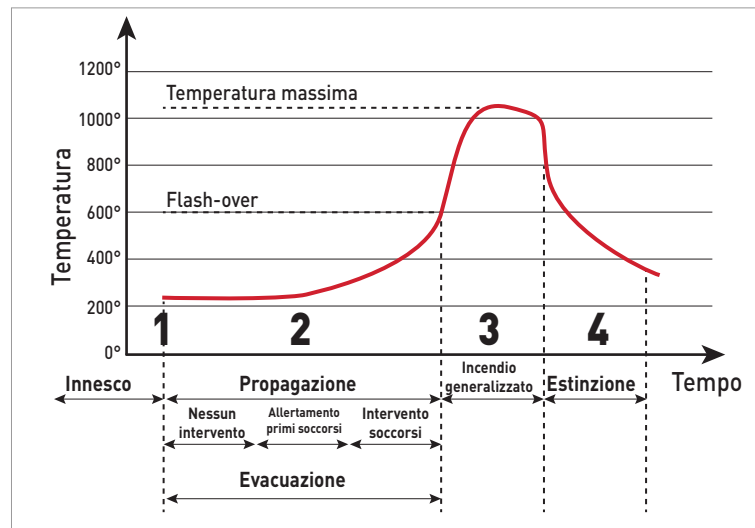


Figura 8.1 - Schema esemplificativo delle fasi di un incendio. I valori delle temperature sono da ritenersi indicativi

Raggiunto il cosiddetto Flash Over si ha l'Incendio generalizzato, con un aumento della temperatura brusco ed elevato e la partecipazione all'incendio di tutti i materiali combustibili presenti. Raggiunta questa fase, l'estinzione ed anche il semplice controllo dell'evento divengono del tutto critici.

Una volta che l'incendio ha esaurito il materiale combustibile disponibile, comincia una progressiva diminuzione delle temperature con conseguente estinzione.

8.1.2 Effetti dell'incendio

La reazione di combustione determina dei prodotti che si possono sinteticamente raggruppare in quattro categorie:

- calore
- fiamme
- fumo
- gas di combustione

A titolo di esempio, oltre a CO_2 e CO , si possono formare idrogeno solforato, anidride solforosa, acido cianidrico, acido cloridrico, fosgene, ammoniaca e altri gas tossici. È necessario sottolineare che l'inalazione di ossido di carbonio e altri gas, o la mancanza di ossigeno, costituiscono la prima causa di mortalità durante un incendio.

Il calore è l'energia termica liberata dall'incendio ed è la causa principale dei danni arrecati alle strutture ed agli impianti. Ovviamente l'esposizione a temperature elevate costituisce un pericolo anche per l'organismo umano, tuttavia la mortalità dovuta ad ustioni si attesta su percentuali piuttosto basse rispetto a quella legata ai gas.

Il fumo è una sospensione in aria di particelle liquide e solide incombuste, la sua opacità dipende tra l'altro dalle caratteristiche delle sostanze che bruciano. Il suo principale effetto è quello di impedire la visibilità, ostacolando l'esodo delle persone e il lavoro delle squadre di soccorso.

8.2 Cenni di prevenzione incendi

Nell'ambito di questa materia vengono studiati, predisposti e sperimentati provvedimenti mirati ad evitare lo sviluppo di un incendio o a limitarne le conseguenze. Più precisamente, gli obiettivi che la prevenzione incendi si prefigge sono:

- ridurre le cause di incendio
- garantire la stabilità delle strutture portanti al fine di assicurare il soccorso agli occupanti
- limitare la produzione e la propagazione di un incendio all'interno di un edificio
- assicurare agli occupanti la possibilità di lasciare l'edificio indenni o di essere soccorsi in altro modo
- garantire alle squadre di soccorso la possibilità di operare in condizioni di sicurezza

Tenendo presente la definizione che segue:

$$\text{rischio} = \text{frequenza} \cdot \text{magnitudo}$$

dove:

- per **frequenza** si intende la probabilità che l'evento si verifichi
- per **magnitudo** si intende l'entità dei danni conseguenti

Si può operare una distinzione tra prevenzione e protezione incendi. La prevenzione mira a ridurre il rischio d'incendio operando sulla frequenza dell'evento; la protezione, al contrario, si prefigge la riduzione dell'entità del danno.

8.3 Protezione antincendio

L'insieme delle misure, dei provvedimenti e dei sistemi operativi utili a limitare le conseguenze di un incendio si definisce "protezione antincendio".

Tali provvedimenti sono di tipo attivo quando presuppongono un intervento umano o impiantistico (reti idranti, impianti di spegnimento automatici, ecc.) altrimenti si considerano di tipo passivo (resistenza al fuoco delle strutture, reazione al fuoco dei materiali, ecc.).

8.3.1 Resistenza al fuoco delle strutture

Il principio fondamentale della tecnica di prevenzione incendi è il contenimento e la limitazione dell'incendio entro l'area in cui si è sviluppato. Questo risultato si realizza attraverso una compartimentazione fisica delle aree considerate a maggior rischio, con pareti tagliafuoco, nonché attraverso la protezione delle strutture costruttive dell'intero edificio.

I criteri per determinare le prestazioni di resistenza al fuoco degli edifici, in caso di attività soggette ai controlli di prevenzione incendi, sono stabiliti dalle norme tecniche specifiche, se presenti, o dal D.M. 09/03/07, che definisce anche il concetto di classe di resistenza al fuoco, ovvero l'intervallo di tempo in minuti durante il quale un compartimento antincendio garantisce la capacità di compartimentazione. Ad esempio classe 60, 90, 120, ecc.

Secondo i requisiti dimostrati, agli elementi costruttivi viene attribuita una sigla seguita da un numero:

- con **R** si identifica un elemento costruttivo che deve conservare, per un determinato tempo, la sua capacità portante;
- con **RE** si identifica un elemento costruttivo che deve conservare, per un determinato tempo, la capacità portante e la tenuta a fiamme, vapori e gas;
- con **REI** si identifica un elemento costruttivo che deve conservare, per un determinato tempo, la capacità portante, la tenuta e l'isolamento termico;
- il numero esprime i minuti per i quali vengono garantite le caratteristiche precedenti.

Si possono quindi incontrare, a titolo d'esempio, elementi R60, RE60, REI120, ecc, da utilizzare nella realizzazione di edifici per i quali è prevista la relativa classe di resistenza al fuoco.

E' utile ribadire che la resistenza al fuoco è una caratteristica propria di una soluzione tecnica e non del semplice materiale.

Strettamente connesso al concetto di classe di resistenza al fuoco è il carico d'incendio, definito dal D.M. 09/03/2007 come il potenziale termico della totalità dei materiali combustibili presenti in uno spazio, corretto in base ai parametri relativi alla partecipazione alla combustione dei singoli materiali. L'unità di misura è il MJ.

E' necessario evidenziare l'importanza rivestita dalla resistenza al fuoco degli elementi costruttivi di un edificio, per quanto riguarda aspetti di resistenza meccanica delle strutture, di compartimentazione e limitazione della propagazione del fuoco, di tutela delle vie di esodo. Alcuni elementi, tuttavia, come le coperture, sono toccati in minor misura da questo argomento o limitatamente a situazioni particolari. Ecco allora assumere notevole rilievo l'aspetto della reazione al fuoco dei materiali.

8.3.2 Reazione al fuoco dei materiali

La reazione al fuoco è una caratteristica propria di un materiale e definisce il suo comportamento in fase di innesco e di propagazione di un incendio.

La reazione al fuoco assume particolare rilevanza nelle costruzioni, per la caratterizzazione sia dei materiali di rifinitura e rivestimento che di quelli da costruzione.

Per la determinazione della reazione al fuoco di un materiale non sono proponibili metodi di calcolo e modelli matematici; essa viene effettuata su basi sperimentali, mediante prove su campioni in laboratorio.

A livello normativo, in Italia, la reazione al fuoco era regolamentata dal DM 26/06/84, che descrive le procedure per la classificazione di reazione al fuoco e l'omologazione dei materiali, definiti in relazione all'impiego e alla modalità di posa in opera.

Nel settore edilizio, a seguito della Direttiva CPD 89/106/CEE (sostituita dal 1 luglio 2013 dal Regolamento UE 305/2011) e dell'entrata in vigore del DM 10/03/05, sono state introdotte la marcatura CE dei prodotti e le Euroclassi per la reazione al fuoco. Il materiale da costruzione viene ora definito come un qualsiasi prodotto fabbricato al fine di essere incorporato in modo permanente in opere da costruzione.

La Gazzetta Ufficiale della Comunità Europea riporta periodicamente tutti i prodotti da costruzione ricadenti nell'ambito dell'applicazione della Direttiva 89/106/CEE, in modo che qualsiasi materiale da costruzione analizzato risulti soggetto a marcatura CE.

Il nuovo sistema di classificazione europea per i prodotti da costruzione richiede ora un'armonizzazione circa i metodi delle prove del comportamento al fuoco, in sostituzione dei diversi metodi nazionali. Restano invece a discrezione degli Stati Membri i livelli di sicurezza relativi alle procedure di costruzione e antincendio.

Le classi di reazione al fuoco, individuate in ambito europeo dalla norma armonizzata EN 13501-1, sono:

- A1
- A2
- B
- C
- D
- E
- F

I prodotti con le migliori prestazioni, in termini di reazione al fuoco, corrispondono alla classe A1, le classi successive indicano prodotti via via meno performanti, fino alla classe F, che raccoglie i materiali non sottoposti a valutazione delle prestazioni di reazione al fuoco.

Esistono inoltre classi complementari che caratterizzano il materiale relativamente alla sua attitudine alla produzione di fumi o al gocciolamento durante la combustione; tali classi, indicate dalle lettere s (smoke) e d (dropping), vengono specificate dopo la classe principale.

Le classi A1 e F non prevedono questa specifica.

I livelli stabiliti per i parametri s e d sono:

- s1 - scarsa emissione di fumo;
- s2 - moderata emissione di fumo;
- s3 - forte emissione di fumo;

- d0 - assenza di gocce incendiate;
- d1 - poche gocce incendiate e/o particelle incandescenti;
- d2 - molte gocce incendiate e/o particelle incandescenti.

Valutata in tal modo la reazione al fuoco dei materiali, le prescrizioni sul loro impiego sono esplicitate, per le attività normate, nelle relative regolamentazioni.

L'utilizzo di materiali non combustibili, in ambito edilizio, determina effetti non trascurabili in caso di incendio: una riduzione dell'entità dell'evento, sia a livello di danni materiali che di prodotti di combustione e, di conseguenza, minore impatto sulle persone presenti nell'edificio e maggiore facilità di intervento per le squadre di soccorso.

La reazione al fuoco dei materiali assume particolare rilevanza in alcune attività ad uso civile quali alberghi, locali di pubblico spettacolo, ospedali, ecc. Per questi luoghi, infatti, specifiche norme di prevenzione incendi prescrivono l'uso obbligatorio di materiali di rivestimento o arredo appartenenti ad una determinata classe di reazione al fuoco.

In molti casi appare di estrema utilità estendere questi criteri ad altre tipologie edilizie, ad esempio quella residenziale, per la quale esperienze dirette degli addetti ai lavori e degli operatori del soccorso testimoniano come una progettazione attenta e una posa effettuata a regola d'arte possano offrire un notevole contributo in termini di protezione di un edificio.

Osservazioni del personale operativo sull'influenza dei metodi costruttivi e dei materiali in relazione agli incendi delle coperture.

Con l'avvento dei tetti ventilati in edilizia e l'utilizzo di canne fumarie in acciaio, attraverso un'analisi degli interventi di soccorso si è potuto notare un notevole incremento dei casi di incendio del camino che spesso, in fabbricati con tetti ventilati in legno, degenerano in incendio generalizzato del tetto.

Nella sola provincia di Bergamo, ad esempio, si verificano oltre un centinaio di interventi di questo tipo all'anno.

Questa incidenza si nota nel periodo invernale, principalmente nei giorni con temperature particolarmente rigide, quando gli utilizzatori tendono a ricorrere all'uso del camino combinato col normale riscaldamento.

Un altro picco si riscontra ai primi freddi, o al termine della stagione invernale.

In generale si può affermare che la causa principale di questi incendi va ricercata nella scarsa/cattiva manutenzione delle canne fumarie e nell'impiego di materiale da ardere scadente. Se, in precedenza, erano interessate canne fumarie in Eternit o in mattoni, con sviluppo di incendio che veniva risolto rapidamente, le canne in acciaio attualmente impiegate originano effetti più gravi.

Spesso un posizionamento errone della canna e un'insufficiente o cattiva coibentazione rispetto all'assito del tetto sono la causa dello sviluppo di un incendio. Ovviamente una maggiore sensibilizzazione degli installatori e dei progettisti sull'argomento potrebbe ridurre drasticamente l'incidenza di incendio dovuto a conduzione termica.

Come detto, l'incendio della canna fumaria tende a trasformarsi in incendio che coinvolge l'intero tetto, in presenza di strutture in legno, e ad evolvere in incendio generalizzato per i tetti ventilati, dove l'effetto camino all'interno dell'intercapedine diffonde rapidamente le fiamme a tutta la copertura.

Questa trasformazione comporta danni ingentissimi poiché un tetto ventilato incendiato, in mancanza di un intervento tempestivo, rischia la completa distruzione, con conseguente inagibilità delle abitazioni sottostanti.

Attaccare e circoscrivere l'incendio di un tetto ventilato è un'operazione complessa, che non sempre giunge a buon fine. Occorre a proposito ricordare che:

- per la sua tipologia costruttiva il tetto ventilato non consente di identificare il focolaio dell'incendio se non con utilizzo di termocamere. Di conseguenza, in attesa dell'arrivo delle squadre di soccorso, non è possibile intraprendere nessuna iniziativa di contenimento;
- le stesse squadre VVF si trovano in difficoltà nell'intervento, in quanto frequentemente è impossibile tagliare la struttura con motoseghe per la presenza di lamierini distanziatori; risulta altresì difficile gettare l'estinguente sulla parte effettivamente incendiata e la permanenza sul tetto risulta spesso difficoltosa per la presenza di materiali da costruzione combustibili che possono determinare lo sviluppo di fumo acre e tossico, con conseguente riduzione della visibilità e necessità di autorespiratori;
- si assiste frequentemente alla comparsa di fenomeni di flashover e backdraft, quasi sconosciuti nel passato, ma attualmente in forte aumento, con ulteriori difficoltà e crescente pericolo per i soccorritori.

La situazione descritta ha portato il Corpo dei Vigili del Fuoco ad approfondire e sviluppare tematiche quali:

- tecniche addestrative (movimento rapido su superfici inclinate, utilizzo di dispositivi tecnologici avanzati, riconoscimento delle condizioni di rischio backdraft);
- nuove procedure operative d'intervento per personale e automezzi;
- introduzione di agenti estinguenti di ultima generazione.

Tuttavia, da parte dei produttori di materiale, dei costruttori edili e degli installatori si auspica altrettanta sensibilità al problema, al fine di introdurre misure di protezione passive che, da un lato, non favoriscano lo sviluppo istantaneo e generalizzato degli incendi e, dall'altro, consentano di limitare i danni alle strutture, rendendo anche le operazioni di soccorso meno ardue per gli addetti antincendio.

A cura di Luciano Roncalli e Dario Zangarini del Comando Provinciale dei Vigili del Fuoco di Bergamo e con la collaborazione della Scuola Edile di Bergamo.



Figura 8.2 - Intervento del personale operativo per lo spegnimento dell'incendio di una copertura (fonte: Dario Zangarini)

8.4 Spunti progettuali

Al fine di una efficace protezione alla diffusione dell'incendio non è solo importante utilizzare materiali con una ridotta o nulla classe di reazione al fuoco.

Infatti vi sono alcuni dettagli semplici, ma importanti da considerare:

- la compartimentazione delle falde fra di loro in corrispondenza del colmo. In presenza di più falde è consigliabile inserire un elemento di compartimentazione, soprattutto in presenza di strato di ventilazione. Tale elemento deve saturare completamente gli interspazi presenti e deve essere realizzato con materiale in Euroclasse A1, quale, ad esempio, lana di roccia;

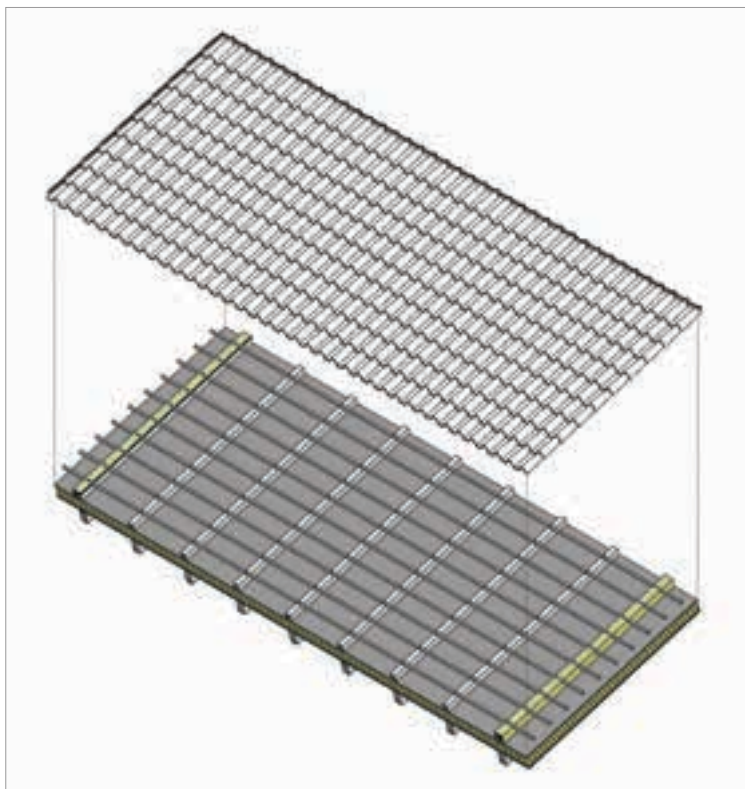


Figura 8.4 - Compartimentazione della falda

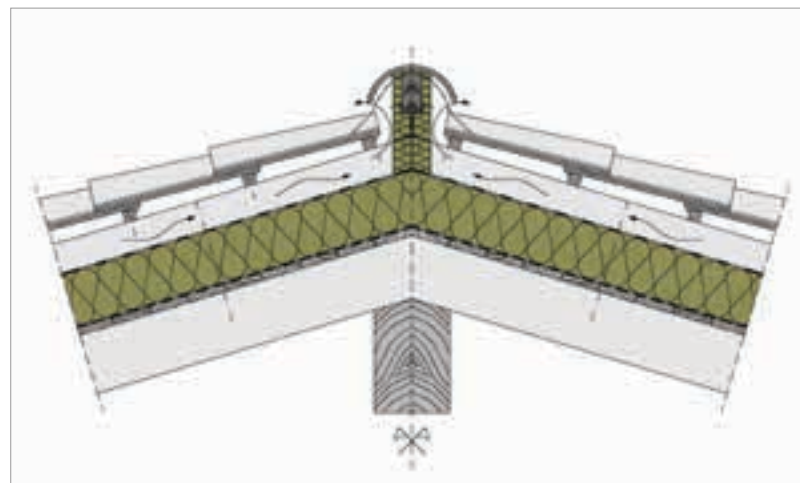


Figura 8.3 - Compartimentazione del colmo

- la compartimentazione trasversale delle falde ventilate. La presenza di uno strato di ventilazione può favorire la diffusione dell'incendio. A tal fine è consigliabile che tale strato venga compartimentato per fasce di falda non superiori a circa **5 metri** con un elemento che deve saturare completamente gli interspazi presenti e che deve essere realizzato con materiale in Euroclasse A1, quale, ad esempio, lana di roccia;
- la compartimentazione delle intercapedini in corrispondenza di terminali impiantistici con rischio di innesco di incendio. In corrispondenza di terminali impiantistici con possibilità di innesco di incendio (quali quelli di adduzione di fumi ad elevate temperature) è consigliabile posizionare, per una corona di larghezza di circa 50 cm, un elemento che deve saturare completamente gli interspazi presenti e deve essere realizzato con materiale in Euroclasse A1, quale, ad esempio, lana di roccia.

CAPITOLO 9

Sistemi di ancoraggio e fissaggio meccanico

Uno dei requisiti fondamentali degli elementi di tenuta all'acqua è la resistenza all'azione del vento.

Infatti una delocalizzazione degli stessi provoca, nella quasi generalità dei casi, infiltrazioni di acqua nell'edificio oltre che possibili pericoli per persone e cose (urto degli elementi delocalizzati).

Si ricorda che gli aspetti propri della progettazione degli elementi strutturali vengono affrontati nel capitolo 3.

Il concetto di base è la valutazione del carico di vento.

Esso si può desumere o dall'Eurocodice 1, o dal testo unico sulle costruzioni (DM 14 gennaio 2008).

Tali testi normativi sono validi per le costruzioni in genere ma possono essere anche applicati alle coperture, tenendo tuttavia presente che, in alcuni casi, particolari morfologie o localizzazioni consigliano di incrementare valori di carico per tenere conto dei fenomeni locali.

Nel testo unico sulle costruzioni, il carico di vento è dipendente dalla localizzazione dell'edificio (l'Italia è stata suddivisa in 9 zone), dall'altitudine del sito, dall'altezza rispetto al suolo della copertura, dalla classe di rugosità dl terreno e dal coefficiente di attrito.

È importante considerare che il vincolo è efficace unicamente se esso comprende, direttamente o indirettamente per interposizione di elementi secondari ("a catena"), anche gli elementi strutturali veri e propri (i travetti e/o il colmo di una copertura con struttura in legno; il solaio in laterocemento, ecc.), altrimenti non è efficace.

Si ricorda che, per quanto riguarda la deformabilità, la freccia dell'elemento di supporto non deve essere maggiore, per le coperture, di 1/200 della luce tra gli appoggi nella condizione più sfavorevole (secondo quanto previsto dalla legislazione vigente).

9.1 Soluzioni di copertura a falde a piccoli elementi ed elementi di collegamento

Nel caso di piccoli elementi non sempre è necessario il vincolo degli stessi agli elementi di supporto; esso dipende dalla pendenza della copertura e dall'intensità di vento. Un utile riferimento è dato dalla norma UNI 9460; a titolo di esempio, per tegole di tipo marsigliese la pendenza massima senza fissaggio è circa il 60% e, per coppi, il 45%.

Gli elementi di supporto (listelli di supporto, listelli per la ventilazione) devono essere vincolati alla struttura principale. In questo caso, il carico di vento, calcolato come indicato in precedenza, deve essere assorbito dagli elementi di fissaggio; non esistono riferimenti normativi in tal senso. Si fa quindi riferimento alle consuetudini d'uso locali rispetto al diametro dei chiodi o delle viti ed alla profondità di ancoraggio.

Una questione da valutare attentamente si ha quando il listello di supporto dell'elemento di tenuta o quello per la ventilazione non si appoggiano direttamente sulle travi o travetti della copertura ma su un elemento termoisolante.

La soluzione, in questo caso, prevede che l'elemento termoisolante venga perforato completamente dall'ancoraggio che, di conseguenza, deve funzionare anche da elemento di contrasto. La sua deformazione sotto un carico di compressione deve essere quindi ridotta. Il carico viene trasmesso linearmente dal listello (nel senso della pendenza della falda o trasversalmente rispetto ad essa) all'elemento termoisolante e, tramite gli ancoraggi, alla struttura principale.

A puro titolo di esempio, con un carico di vento di circa 1000 N/m^2 ⁽¹⁾, un peso proprio della copertura pari a 500 N/m^2 ed un passo dei listelli di 50 cm, si ha un carico lineare pari a 750 N. Supposta la larghezza di un listello pari a 4 cm, si ha un carico pari a circa $1,8 \text{ N/cm}^2$.

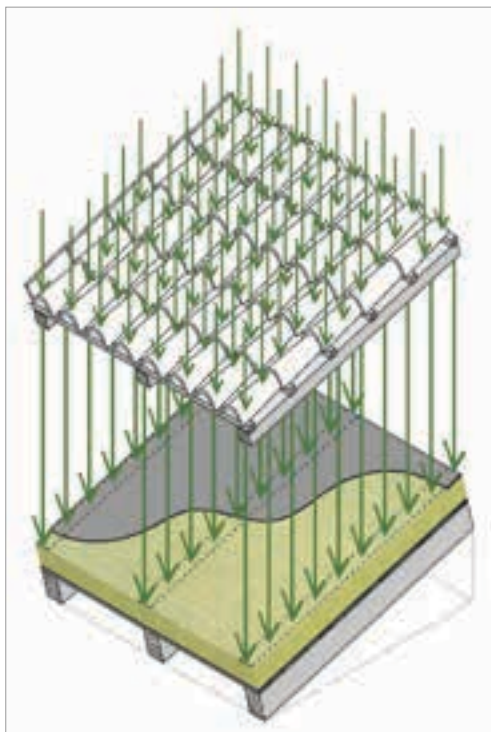


Figura 9.1 - Esempio di ripartizione dei carichi

È consigliabile che, sotto questo carico, la deformazione locale massima dell'elemento termoisolante sia molto bassa, in quanto una deformazione elevata potrebbe deformare eccessivamente l'elemento stesso e provocarne la rottura, oltre che aumentarne la conducibilità specifica.

Di conseguenza la scelta del materiale termoisolante deve essere effettuata considerando un congruo coefficiente di sicurezza fra il valore dato nella scheda tecnica per il carico puntuale e quello desunto dal calcolo.

Allo stato attuale, per i materiali normalmente utilizzati per l'isolamento termico, non sono a disposizione normative che indichino la metodologia di prova per un carico lineare, ma solo per un carico distribuito o per un carico puntuale con area di carico circolare di superficie pari a 50 cm^2 . A titolo indicativo viene proposta, per il caso in esame, una verifica secondo la metodologia di prova con carico puntuale. Per esempio, se il prodotto indicasse in scheda tecnica un carico puntuale (secondo UNI EN 12430) pari a 400 N, (con un'area di carico di prova di 50 cm^2) si avrebbe un sigma massima ammissibile pari 8 N/cm^2 . Adottando, ad esempio, un coefficiente di sicurezza pari a 3, si avrebbe un sigma massima di progetto pari a circa $2,7 \text{ N/cm}^2$, congrua rispetto al valore di $1,8 \text{ N/cm}^2$ indicato sopra.

La scelta deve essere fatta valutando evidentemente il possibile guasto che una deformazione eccessiva del materiale termoisolante potrebbe provocare al sistema di tenuta ed agendo poi di conseguenza.

Ne risulta che tale fenomeno è particolarmente importante per coperture ad elevato spessore di elemento termoisolante, dove l'accettazione di una eccessiva deformazione sotto carico potrebbe indurre danneggiamento del materiale. In fase di esecuzione è quindi necessario formare adeguatamente gli operatori al fine di non provocare azioni (avvitamento o simili) non accettabili sull'elemento termoisolante.

9.2 Soluzioni di copertura a falde a grandi elementi ed elementi di collegamento

Per tali soluzioni valgono le indicazioni prima date. Si fa presente che, nei casi di copertura ventilata, diventa importante il cosiddetto "effetto vela", in quanto il vento penetra al di sotto dell'elemento di tenuta intensificando l'azione di estrazione della stessa.

In questi casi è sempre consigliabile effettuare prove di pull-off, soprattutto se si è di fronte ad elementi strutturali in legno per i quali non è esattamente conosciuto il carico di estrazione di una vite o di un chiodo. Un utile riferimento, per quanto riguarda le indicazioni esecutive, è dato dalla norma UNI 10372:2004.

La resistenza alle forze (depressione e compressione) può essere migliorata in particolar modo sui giunti tra copertura e muri verticali e sui bordi, che necessitano di particolari misure perché sia garantita la sicurezza della copertura discontinua. Il numero e la posizione dei fissaggi devono essere tali da garantire la resistenza alle sollecitazioni indotte dalle azioni sopra riportate. È comunque necessario che lungo le linee del colmo, della gronda e dei compluvi, delle sovrapposizioni e delle parti aggettanti dal perimetro della costruzione siano intensificati i fissaggi. In funzione della forma delle lamiere, del materiale costituente e della distanza tra gli appoggi, può essere necessario un fissaggio di cucitura nella sovrapposizione di due lamiere contigue e/o l'impiego di un eventuale cavallotto sottostante.

¹Si ricorda che $9,81 \text{ N/unità di superficie}$ corrisponde a $1 \text{ kg/unità di superficie}$

9.3 Soluzioni di copertura continua ed elementi di collegamento

Per quanto riguarda il fissaggio meccanico dell'elemento di tenuta (membrane impermeabilizzanti) per le coperture piane, definito il carico di vento, è necessario verificare soprattutto:

- la resistenza allo sfilamento dal supporto del fissaggio meccanico (mediante prove di pull-off);
- la resistenza alla lacerazione della membrana impermeabilizzante (in quanto essa si può lacerare in corrispondenza del fissaggio);
- il dimensionamento del fissaggio (diametro) e la lunghezza di ancoraggio.

In corrispondenza dei bordi della copertura (per una larghezza di almeno 1/10 del lato) ed in corrispondenza degli angoli (per una lunghezza di circa 1/4) si devono intensificare i fissaggi, in quanto le azioni sono rispettivamente circa il 50% in più ed il doppio della parte corrente.

9.4 Esempio di calcolo di fissaggi (per punti) di una copertura piana

I passi del processo sono:

- calcolo dell'azione del vento (Q_v), determinabile secondo le normative indicate;
- definizione della resistenza all'estrazione del singolo fissaggio;
- determinazione del numero minimo di fissaggi mediante la formula:

$$n = 1.5 \cdot [Q_v / 9.81] / \check{N}$$

dove:

- \check{N} è la resistenza all'estrazione del fissaggio, dipendente dalle caratteristiche del fissaggio stesso, di quelle del supporto e della modalità di posa; tale valore viene ricavato mediante schede tecniche di prodotto. Si consiglia inoltre di effettuare prove in situ per verificare l'effettiva resistenza all'estrazione;
- 1.5 è il coefficiente di sicurezza che viene normalmente adottato.

CAPITOLO 10

Cenni sul dimensionamento dei sistemi di raccolta e allontanamento delle acque meteoriche

Il progetto dei sistemi di raccolta ed allontanamento delle acque meteoriche è definibile attraverso la normativa UNI EN 12056-2 che ha sostituito la UNI 9184 (in vigore fino a pochi anni fa).

Una progettazione completa del sistema comprende le seguenti fasi:

- raccolta dati climatici, definizione dei carichi agenti sulla copertura e individuazione della geometria dell'edificio;
- definizione dei materiali costituenti gli elementi tecnici;
- progettazione idraulica dei vari elementi che convogliano le acque meteoriche;
- dimensionamento meccanico degli elementi di collegamento tra il sistema di smaltimento e l'edificio;
- progettazione tecnologica;
- progettazione operativa riguardante la messa in opera del sistema;
- progettazione della manutenzione riguardante la fase di vita utile del sistema;
- fase di collaudo.

In questo capitolo verrà affrontata la fase di progettazione idraulica.

10.1 Criteri generali di progettazione

Una delle prime decisioni importanti, in quanto maggiormente vincolata da elementi estranei alla copertura, è la definizione della posizione dei pluviali che ha, in genere, come vincoli:

- i regolamenti comunali;
- la possibilità di scarico a terra;
- la presenza di balconi o terrazze sottostanti (che è buona norma non attraversare);
- le esigenze estetiche della facciata (simmetrie, disegni particolari) nel caso in cui i pluviali fossero a vista;
- la geometria della copertura;
- la massima superficie di competenza, in genere inferiore a 150 m²;
- il massimo diametro ammissibile in relazione all'integrabilità con le pareti perimetrali verticali, quando i pluviali sono incassati;
- la possibilità di allacciamento con le fognature;
- la necessità di non avere forti dislivelli fra un estremo e l'altro dei canali di gronda dove esistano necessità di tipo formale e, quindi, avere una distanza fra pluviali non superiore ai 10 m (dislivello di circa 5 cm).

Per definire la corretta posizione dei pluviali si deve operare "a sistema" con la progettazione delle pendenze.

Per le coperture planari orizzontali i passaggi sono:

1. individuare tutti i vincoli esistenti;
2. definire le potenziali posizioni dei pluviali, possibilmente secondo i criteri di simmetria della copertura;
3. individuare i possibili sistemi di pendenze della copertura;
4. fissare la posizione definitiva dei pluviali.

Per le coperture planari inclinate si procede come per le coperture piane tralasciando il problema dell'individuazione dei sistemi di pendenza in quanto già determinata dal progetto architettonico.

10.2 Criteri generali di dimensionamento di canali di gronda e pluviali

10.2.1 Calcolo della portata di acqua da fare defluire

La portata di acqua da fare defluire attraverso un elemento (conversa, canale, ecc.) è semplicemente calcolabile tramite la seguente formula:

$$Q = r \cdot A \cdot C \cdot Cr$$

dove:

- Q è la portata di acqua [l/s];
- r è l'intensità della precipitazione [l/sm²];
- A è l'area effettiva della copertura [m²];
- C è coefficiente di scorrimento;

L'intensità della precipitazione si ricava dai dati climatici (ISTAT o altro). È consigliabile utilizzare una serie storica di almeno 20 anni e utilizzare il dato relativo all'evento meteorico di massima intensità.

Il coefficiente di scorrimento C dipende dal tipo di materiale sul quale scorre l'acqua in copertura, in particolare:

- per coperture con elemento di tenuta (ultimo strato) in tegole, metallico, bituminoso, in PVC, ecc: C è uguale a 1;
- per coperture a verde (giardini pensili): C varia da 0.1 a 0.8 (a seconda dello spessore dello strato colturale, vedi UNI 11235).

Il coefficiente di rischio Cr è desumibile dalla seguente tabella:

Descrizione	Cr
Cornicioni di gronda normali	1,0
Cornicioni di gronda posti in zone dove la tracimazione di acqua causerebbe disagi particolari (zone di forte passaggio di persone)	1,5
Canali di gronda interni dove, in occasione di piogge di intensità superiore a quelle di progetto, si avrebbero infiltrazioni all'interno dell'edificio	2,0
Canali di gronda interni di edifici a particolare destinazione (ospedali, impianti di telecomunicazione, musei, depositi di sostanze che diventano tossiche a contatto con acqua, ecc.)	3,0

Tabella 10.1 - Coefficiente di rischio Cr

Definita la quantità di acqua da smaltire, è necessario definire le sezioni idrauliche di canali di gronda e pluviali.

10.2.2 Progettazione idraulica dei cornicioni di gronda e dei canali di gronda (secondo UNI EN 12056-3)

La normativa differenzia il calcolo a seconda della forma della sezione trasversale del canale e della sua lunghezza.

Cornicioni di gronda semicircolari o simili, progettati come orizzontali e provvisti di bocche di efflusso in grado di garantire lo scarico libero.

La capacità viene calcolata secondo la seguente formula:

$$Q_L = 0.9 \cdot Q_N$$

dove:

- Q_L è la capacità di progetto di canali di gronda "corti" orizzontali [l/s];
- Q_N è la capacità nominale di un canale di gronda, calcolata mediante la formula seguente:

$$Q_N = 2.78 \cdot 10^{-5} \cdot A_E^{1.25}$$

dove:

- A_E è la sezione trasversale totale del canale di gronda [mm²].

Cornicioni di gronda rettangolari, trapezoidali o simili, progettati come orizzontali e provvisti di bocche di efflusso in grado di garantire lo scarico libero

La capacità viene calcolata secondo la seguente formula:

$$Q_L = 0.9 \cdot Q_N$$

dove:

- Q_L è la capacità di progetto di canali di gronda "corti" orizzontali [l/s];
- Q_N è la capacità nominale di un canale di gronda, calcolata mediante la formula seguente:

$$Q_N = Q_{SE} \cdot F_D \cdot F_S$$

dove:

- Q_{SE} è calcolato secondo la seguente formula: $Q_{SE} = 3.48 \cdot 10^{-5} \cdot A_E^{1.25}$
- F_D è il coefficiente di profondità, ricavabile dalla figura 10.1, in funzione del rapporto W/T;
- F_S è il coefficiente di forma, ricavabile dalla figura 10.2, in funzione del rapporto S/T;
- A_E è la sezione trasversale totale del canale di gronda [mm²].

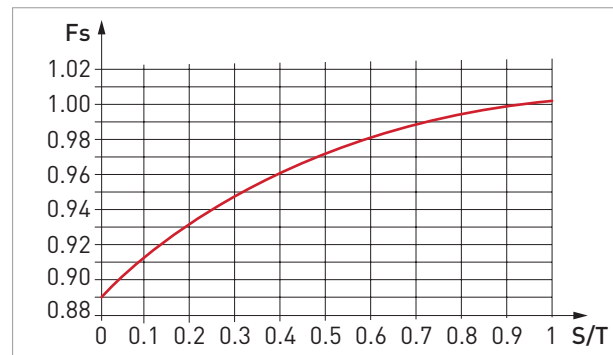
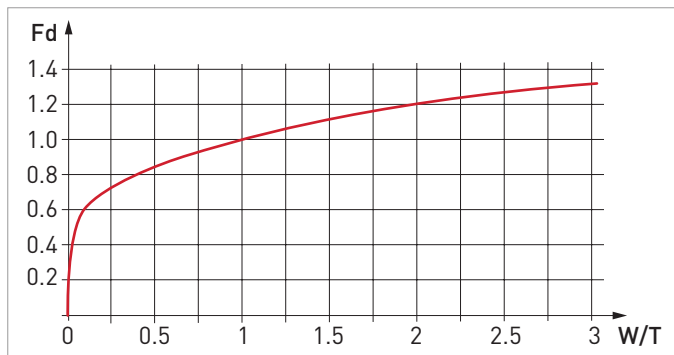


Figura 10.1 - Coefficiente di profondità F_d

Figura 10.2 - Coefficiente di forma F_s

Per canali di gronda lunghi o con pendenza (verso la bocca di efflusso) la capacità è ricavabile secondo la seguente formula:

$$Q_L = Q_L \text{ (corto)} \cdot F_L$$

dove:

- Q_L (corto) è la capacità ricavabile dalle formule precedentemente esposte;
- F_L è il coefficiente di capacità, ricavabile dalla Tabella 10.2.

L/W	Pendenza ≤0,4%	Pendenza 0,4%	Pendenza 0,6%	Pendenza 0,8%	Pendenza 1,0%
50	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
75	0,97	1,02	1,04	1,07	1,09
100	0,93	1,03	1,08	1,13	1,18
125	0,90	1,05	1,12	1,20	1,27
150	0,86	1,07	1,17	1,27	1,37
175	0,83	1,08	1,21	1,33	1,46
200	0,80	1,10	1,25	1,40	1,55
225	0,78	1,10	1,25	1,40	1,55
250	0,77	1,10	1,25	1,40	1,55
275	0,75	1,10	1,25	1,40	1,55
300	0,73	1,10	1,25	1,40	1,55
325	0,72	1,10	1,25	1,40	1,55
350	0,70	1,10	1,25	1,40	1,55
375	0,68	1,10	1,25	1,40	1,55
400	0,67	1,10	1,25	1,40	1,55
425	0,65	1,10	1,25	1,40	1,55
450	0,63	1,10	1,25	1,40	1,55
475	0,62	1,10	1,25	1,40	1,55
500	0,60	1,10	1,25	1,40	1,55

Tabella 10.2 - Coefficiente di capacità F_L

10.2.3 Progettazione idraulica dei pluviali

La progettazione idraulica dei pluviali deve definire la sezione idraulica e quindi ha come dato di partenza l'altezza di pioggia.

La capacità delle bocche di efflusso dipende dalla morfologia del fondo.

Per fondo piatto sono applicabili le seguenti formule:

$$Q_0 = k_0 \cdot D^2 \cdot h_{0,5} / 15000$$

dove:

- Q_0 è la capacità della bocca di efflusso [l/s];
- D è il diametro efficace della bocca di efflusso [mm];

- h è il carico alla bocca di efflusso [mm];
- k_0 è il coefficiente di scarico, pari a 1,0 per le bocche a scarico libero e pari a 0.5 per bocche di efflusso provviste di filtri o simili.

Il carico h alla bocca di efflusso è calcolabile secondo la seguente formula:

$$h = W \cdot F_n$$

dove:

- W è l'altezza di progetto dell'acqua;
- F_n è il coefficiente di carico alla bocca di efflusso, ricavabile dalla figura 10.3;

D è il diametro efficace, ricavabile dalla figura 10.4.

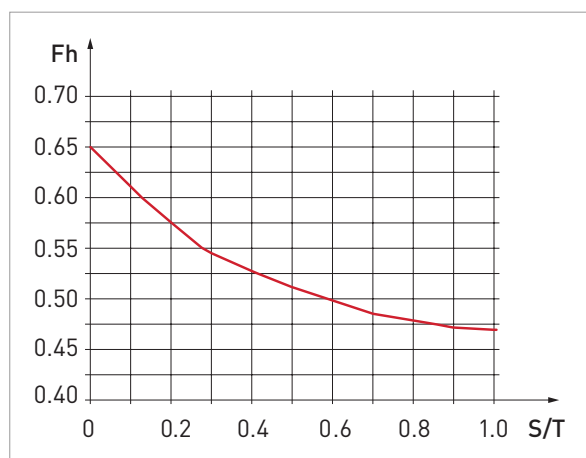


Figura 10.3 - Coefficiente di carico F_n

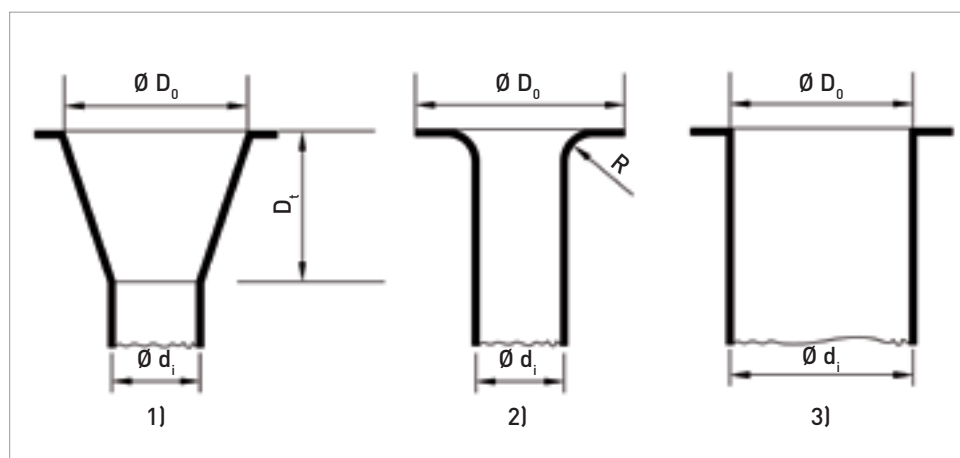


Figura 10.4 - Diametro efficace D

Legenda:

1. bocca di efflusso conica; $D_0 \geq 1,5 \cdot d_i$; $D_i \geq D_0$; diametro efficace $D = D_0$;
2. bocca di efflusso con spigoli arrotondati; $D_0 \geq 1,5 \cdot d_i$; $R \geq D_0/6$; diametro efficace $D = 0,9 \cdot D_0$;
3. bocca di efflusso a spigoli vivi; Diametro efficace $= D_0 = d_i$.

Per canali con fondo non piatto, si può dire che quando la zona prospiciente alla bocca ha una superficie piana pari al doppio della sezione trasversale del pluviale più piccolo in grado di smaltire la portata di progetto, la capacità della bocca è simile a quella del canale di gronda.

Per quanto riguarda il dimensionamento del pluviale si fa riferimento alla tabella 10.3, che collega la capacità idraulica al diametro del pluviale, in base al grado di riempimento, compreso fra 0.20 e 0.33. In generale viene utilizzato 0.33.

Diametro interno del pluviale [mm]	Capacità idraulica	
	riempimento 0,20 [l/s]	riempimento 0,33 [l/s]
50	0,7	1,7
55	0,9	2,2
60	1,2	2,7
65	1,5	3,4
70	1,8	4,1
75	2,2	5,0
80	2,6	5,9
85	3,0	6,9
90	3,5	8,1
95	4,0	9,3
100	4,6	10,7
110	6,0	13,8
120	7,6	17,4
130	9,4	21,6
140	11,4	26,3
150	13,7	31,6
160	16,3	37,5
170	19,1	44,1
180	22,3	51,4
190	25,7	59,3
200	29,5	68,0
220	38,1	87,7
240	48,0	110,6
260	59,4	137,0
280	72,4	166,9
300	87,1	200,6
> 300	$2,5 \cdot 10^{-4} \cdot k_0^{-0,167} \cdot d_i^{2,667} \cdot f^{1,667}$ dove: k_0 è la scabrezza del pluviale, considerata 0,25 mm; d_i è il diametro interno del pluviale	

Tabella 10.3 - Diametro pluviale